

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CINTHIA SCHIMITH SILVA COELHO

SIMULADOR DE MEDIDAS E ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICOS UTILIZANDO
TÉCNICAS DE DESACOPLAMENTO

Curitiba, 2017.

CINTHIA SCHIMITH SILVA COELHO

SIMULADOR DE MEDIDAS E ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICOS UTILIZANDO
TÉCNICAS DE DESACOPLAMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Elizete Maria Lourenço

Curitiba, 2017.

C672s

Coelho, Cinthia Schimith Silva

Simulador de medidas e estimador de estado trifásicos utilizando técnicas de desacoplamento / Cinthia Schimith Silva Coelho. – Curitiba, 2017.
126 f. : il. color ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Orientador: Elizete Maria Lourenço

Bibliografia: p. 101-103.

1. Medidas elétricas. 2. Energia elétrica – Transmissão. 3. Eletricidade –
Medidas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Lourenço, Elizete Maria. III.
Título.

CDD: 621.374



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CINTHIA SCHIMITH SILVA COELHO** intitulada: **SIMULADOR DE MEDIDAS E ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE DESACOPLAMENTO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 09 de Junho de 2017.

ELIZETE MARIA LOURENÇO

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA

Avaliador Interno (UFPR)

RAPHAEL AUGUSTO DE S BENEDITO

Avaliador Externo (UTFPR)

ROMAN KUIAVA

Avaliador Interno (UFPR)

COELHO, C. S. S. Simulador de Medidas e Estimador de Estado Trifásico Utilizando Técnicas de Desacoplamento. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um simulador de medidas trifásico que possa ser aplicado a redes de transmissão e distribuição além da utilização de técnicas de desacoplamento aplicadas a um estimador de estado trifásico. Para tanto o trabalho apresenta inicialmente a formulação do fluxo de carga trifásico convencional monofásico, como também a técnica desacoplado rápido monofásico e por fim a modelagem trifásica de fluxo de carga desacoplado rápido. Este estudo justifica-se posteriormente em sua aplicação na elaboração do simulador de medidas. Em seguida é apresentada a modelagem convencional do estimador de estado, como também sua resolução através de diferentes métodos desacoplados. O simulador de medidas é uma ferramenta realizada em duas etapas: primeiro um fluxo de potência trifásico desacoplado rápido que processa os dados de entrada de um sistema, dando como resultados valores que serão utilizados como medidas perfeitas. A segunda etapa consiste na adição de erros a estas medidas, que conforme estudado no trabalho, podem ter diferentes classificações, porém o simulador propõe que sejam apenas ruídos convencionais. O fluxo de potência trifásico utilizado no simulador de medidas utiliza a normalização complexa, que permite o processamento de sistemas de distribuição e transmissão. O estimador de estados trifásicos utilizará de métodos de desacoplamento para processar estas medidas geradas pelo simulador, e desconsiderando as mútuas do sistema, é modelado como a junção de três sistemas independentes para cada fase. Para análise do desempenho do simulador e do estimador de estados, ambos são testados em sistemas de distribuição e transmissão. O simulador de medidas apresentou um resultado satisfatório para os dois tipos de sistema, e o estimador tem uma resposta melhor ao sistema de transmissão.

Palavras chave: Simulador de Medidas. Estimador de Estados Trifásico. Método Desacoplado.

COELHO, C. S. S. Measures Simulator and Three-Phase State Estimator Using Decoupled Methods. 129 pp. Dissertation (Master's in Electrical Engineering) – Department of Electrical Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, 2017.

ABSTRACT

This work proposes the development of a three-phase measures simulator that can be applied in transmission and distribution systems, and also the use of decoupling techniques applied for a three-phase state estimator. This work presents initially the formulation of a conventional single-phase load flow and of a single-phase fast decoupled, and the modeling of the three-phase fast decoupled load flow. This study is justified lately in the elaboration of the measures simulator. Later on, the conventional modeling of the state estimator is exposed, as also its resolution through different decoupled methods. The measures simulator is a two-steps tool: first a three-phase decoupled load flow that process the systems input data, being its result the values that will be used as perfect measures. The second step is the addition of errors in those measures, which can have different classifications, although the simulator does not use bad data, only regular errors. The three-phase load flow in the measures simulator uses complex normalization, allowing the process of distribution and transmission systems. The three-phase state estimator uses decoupled methods to process the measures generated by the system, disregarding mutual coupling, therefore analyzing each of the three phases independently. The measures simulator and state estimator performance analysis are made by distribution and transmission test-systems. The measures simulator presented a satisfactory result for both types of system, and the state estimator had a better response to the transmission one.

Key Words: Measures Simulator. Three-Phase State Estimator. Decoupled Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA FLUXO DE CARGA DESACOPLADO TRIFÁSICO.....	39
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA SIMULADOR DE MEDIDAS E ENSAIOS DE ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICO.....	57
FIGURA 3 – SIMULADOR DE MEDIDAS TRIFÁSICO	66
FIGURA 4 – FASE A DO SISTEMA ILUSTRATIVO DE DUAS BARRAS	75
FIGURA 5 – SISTEMA-TESTE IEEE 30 BARRAS	80
FIGURA 6 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “A” SISTEMA DE 30 BARRAS	85
FIGURA 7 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “B” SISTEMA DE 30 BARRAS	86
FIGURA 8 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “C” SISTEMA DE 30 BARRAS	86
FIGURA 9 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “A” SISTEMA DE 30 BARRAS.....	87
FIGURA 10 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “B” SISTEMA DE 30 BARRAS.....	88
FIGURA 11 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “C” SISTEMA DE 30 BARRAS.....	89
FIGURAS 12 – SISTEMA-TESTE 69 BARRAS	90
FIGURA 13 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “A” SISTEMA DE 69 BARRAS	95
FIGURA 14 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “B” SISTEMA DE 69 BARRAS	95
FIGURA 15 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “C” SISTEMA DE 69 BARRAS	96
FIGURA 16 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “A” SISTEMA DE 69 BARRAS.....	96
FIGURA 17 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “B” SISTEMA DE 69 BARRAS.....	97

FIGURA 18 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “C”	
SISTEMA DE 69 BARRAS.....	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE BARRAS.....	25
TABELA 2 – f_e ATÉ 14 BARRAS.....	68
TABELA 3 – f_e ACIMA 14 BARRAS.....	68
TABELA 4 – MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE DUAS BARRAS	76
TABELA 5 – CONVERGÊNCIA DO SISTEMA DE 12 BARRAS EM PU E CPU	78
TABELA 6 – ESTADO REAL DO SISTEMA DE 12 BARRAS	78
TABELA 7 – MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE 12 BARRAS	78
TABELA 8 - MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE 30 BARRAS	79
TABELA 9 – PARÂMETROS DO SISTEMA-TESTE 30 BARRAS.....	81
TABELA 10 - DEMANDA DO SISTEMA-TESTE 69 BARRAS.....	91
TABELA 11 – SISTEMAS-TESTE UTILIZADOS PARA ESTUDO DE ESTIMADOR DE ESTADO.....	99
TABELA I. A - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 ÂNGULOS DE FASE PARA 30 BARRAS.....	106
TABELA I. B RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 MÓDULO DE TENSÃO PARA 30 BARRAS.....	106
TABELA I. C - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 ÂNGULOS DE FASE PARA 30 BARRAS.....	107
TABELA I. D - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 MÓDULO DE TENSÃO PARA 30 BARRAS.....	108
TABELA I. E - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 ÂNGULOS DE FASE PARA 69 BARRAS.....	109
TABELA I. F - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 MÓDULO DE TENSÃO PARA 69 BARRAS.....	111
TABELA I. G - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 ÂNGULOS DE FASE PARA 69 BARRAS.....	113
TABELA I. H - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 MÓDULO DE TENSÃO PARA 69 BARRAS.....	115

TABELA I. I - RESULTADOS COMPLETOS MEDIDAS SISTEMA 30 BARRAS	117
TABELA I. J - RESULTADOS COMPLETOS MEDIDAS SISTEMA 69 BARRAS	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SCADA	Sistema de supervisão e aquisição de dados
EE	Estimador de estado
CA	Corrente alternada
CPU	Normalização complexa
RTU	<i>Roof top units</i>
PMU	<i>Phasor measurement units</i>
FP3-DR	Fluxo de Potência trifásico Desacoplado Rápido
GD	Geração Distribuída

LISTA DE SÍMBOLOS

V_k – magnitude da tensão nodal na barra k

θ_k – ângulo da tensão nodal na barra k

P_k – injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k

Q_k – injeção líquida de potência reativa na barra k

$k = 1, \dots, NB$ onde NB é o número de barras da rede

Ω_k – conjunto das barras vizinhas da barra k

V_k, V_m – magnitude das tensões das barras terminais do ramo $k - m$

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$

P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo $k - m$

Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo $k - m$

Q_k^{sh} - componente da injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra k .

$[Y]$ é a matriz admitância,

G_{km}, B_{km} – coeficientes reais e imaginários da matriz admitância

Ω_k – conjunto das barras vizinhas da barra k

K – conjunto formado pelos elementos do conjunto Ω_k mais a própria barra k .

x – vetor das variáveis de estado

Δx – valores das variáveis de estado

ΔP – vetor dos desvios de potência ativa

ΔQ – vetor dos desvios de potência reativa

P_{esp} – vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras PQ e PV

Q_{esp} – vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras PQ

P – vetor das injeções de potência ativa

Q – vetor das injeções de potência reativa x – vetor das variáveis de estado

$g(x)$ – função vetorial da variável x do fluxo de potência

$J(x)$ – matriz Jacobiana associada ao sistema fluxo de potência

H, N, M e L – submatrizes da matriz Jacobiana, dadas por $\partial P_k / \partial \theta_m, \partial P_k / \partial V_m, \partial Q_k / \partial \theta_m, \partial Q_k / \partial V_m$

B', B'' - submatrizes Jacobianas associadas ao método desacoplado rápido

$medida_{ik}^{pm}$ - valor de medida relacionando a barra i de fase p , e a barra k de fase m .

$\Delta P_{gen.j}$ – desvio de potência ativa do gerador j

$P_{gen.j}^{SP}$ – potência ativa total especificada na saída do gerador j

$|V|_{int.j}$ – magnitude de tensão da barra interna do gerador j

$|V|_{term.j}^{esp}$ – tensão do regulador especificada para os três terminais de tensão do gerador j

ng - número de geradores

p – fase

nb - número de barras

\bar{z} – vetor de m medidas do sistema, de dimensão $(mx1)$

\bar{x} – vetor das variáveis de estado do sistema, de dimensão $(nx1)$, sendo $n < m$

$\bar{h}(\bar{x})$ – vetor função não-linear que relaciona as medidas aos estados, de dimensão $(mx1)$.

\bar{e} – vetor de erros de medidas, de dimensão $(mx1)$.

$\bar{G}(\bar{x}^k)$ - matriz ganho.

$\bar{H}(\bar{x})$ - matriz jacobiana

\bar{z}_p – medidas ativas

ΔP_i^p - desvio de potência ativa da fase p da barra i ;

ΔQ_i^p - desvio de potência reativa da fase p da barra i ;

$(P_i^p)^{sp}$ - potência ativa especificada da fase p da barra i ;

$(Q_i^p)^{sp}$ - potência reativa especificada da fase p da barra i ;

V_i^p - módulo da tensão da fase p da barra i ;

θ_{ik}^{pm} é a diferença angular entre as fases p e m das barras i e k , respectivamente;

G_{ik}^{pm}, B_{ik}^{pm} são os coeficientes reais e imaginários, respectivamente, da matriz de admitâncias referentes às fases p e m entre as barras i e k .

\bar{z}_q – medidas reativas

$\bar{H}_{P\theta}, \bar{H}_{PV}, \bar{H}_{Q\theta}, \bar{H}_{QV}$ – submatrizes da matriz jacobiana

$Sbase$ – potência de base complexa

$Vbase$ – tensão de base

ϕ_{base} – ângulo base para a potência de base complexa Z_{base} – impedância complexa de base

Z_{pu} – impedância de um ramo em base convencional (sistema por unidade – pu)

Z_{cpu} – impedância de um ramo em base complexa (cpu)

$t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c$ – medidas do fluxo de potência ativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$t_{mk}^a, t_{mk}^b, t_{mk}^c$ – medidas do fluxo de potência ativa para o ramo $m - k$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c$ – medidas do fluxo de potência reativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$u_{mk}^a, u_{mk}^b, u_{mk}^c$ – medidas do fluxo de potência reativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente

P_k^a, P_k^b, P_k^c – medidas de injeção de potência ativa para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c – medidas de injeção de potência reativa para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

V_k^a, V_k^b, V_k^c – medidas de módulo de tensão para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

$\theta_k^a, \theta_k^b, \theta_k^c$ – medidas tensão para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

σ_Z - desvio padrão associado à medida;

$|Z_o|$ - modulo do vetor verdadeiro da medida

Z_o ; pr - precisão do medidor

fe - fundo de escala do medidor

α - Variável Aleatória $N(0,1)$.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 HISTÓRICO	16
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivo Específico.....	22
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO	24
2.1 INTRODUÇÃO.....	24
2.2 FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA.....	24
2.3 ALGORITMOS BÁSICOS DO FLUXO DE CARGA NÃO-LINEAR	26
2.4 FLUXO DE CARGA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	28
2.5 FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO	30
2.6 FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO DESACOPLADO RÁPIDO	34
3. ESTIMAÇÃO DE ESTADO	41
3.1 INTRODUÇÃO.....	41
3.2 ESTIMADOR DE ESTADO CONVENCIONAL	41
3.3 PROBLEMA DOS MÍNIMOS QUADRADOS	43
3.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS	44
3.5 ESTIMADORES DESACOPLADOS	47
3.6 ESTIMADOR DESACOPLADO NO MODELO	48
3.7 ESTIMADOR DESACOPLADO NO ALGORÍTMO	51
4. SIMULADOR DE MEDIDAS E ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICOS	56
4.1 INTRODUÇÃO.....	56
4.2 SIMULADOR DE MEDIDAS	57
4.2.1 Fluxo de Potência Trifásico	58
4.2.2 Simulador de Medidas Trifásico	63
4.2.3 Gerador de Medidas Verdadeiras: 1ª Etapa.....	65
4.2.4 Etapa 2: Simulador de Erros de Medição.....	66
4.3 ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICO PROPOSTO.....	69
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	73

5. RESULTADOS	75
5.1 INTRODUÇÃO.....	75
5.2 TESTE SIMULADOR DE MEDIDAS.....	75
5.2.1 Sistema ilustrativo de duas barras	75
5.2.2 Sistema teste 12 barras – Sistema de distribuição com GD	77
5.2.3 Sistema teste IEEE 30 barras – Sistema de transmissão	79
5.3 TESTE ESTIMADOR DE ESTADOS TRIFÁSICO	80
5.3.1 Sistema teste 1 – Sistema de Transmissão	80
5.3.1.1 Caso 1	83
5.3.1.2 Caso 2	84
5.3.2 Sistema 2 – Sistema de Distribuição	90
5.3.2.1 Caso 1	93
5.3.2.2 Caso 2	94
5.4 CONCLUSÕES.....	99
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6.1 CONCLUSÕES.....	101
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERENCIAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

Para uma operação efetiva e de boa qualidade no sistema elétrico é preciso um controle pleno do sistema. As condições de operação da rede podem ser determinadas caso o centro de operação consiga monitorar o sistema a partir das tensões complexas de cada barra da rede elétrica. O objetivo do centro de operações é determinar o estado do sistema e mantê-lo no estado de normal-seguro.

É chamado estado do sistema normal aquele no qual as cargas do sistema podem ser supridas pelos geradores existentes sem ultrapassar nenhuma restrição operacional como limites de fluxo nas linhas de transmissão e limites máximos e mínimos de tensão nas barras. Já o estado de emergência é aquele em que alguns eventos inesperados podem fazer com que o sistema, apesar de estar plenamente suprido, opere com as condições operacionais violadas (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004).

Para determinar o estado do sistema é preciso analisá-lo em tempo real, o que envolve a aquisição de medidas recebidas nos centros de operação. A comunicação dessas medidas, sejam essas analógicas ou digitais, são recebidas e processadas por uma rede de área local junto com o Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – Scada*).

A quatro décadas Fred Schweppe propôs o Estimador de Estado (EE) (SCHWEPPE, 1970) ao constatar que os dados do SCADA poderiam nem sempre ser confiáveis, devido aos erros de medida, falhas na telemetria, ruídos na comunicação etc. Além disso, o conjunto de medidas coletadas pode não permitir a extração direta do estado de operação de corrente alternada do sistema. Mesmo com as medidas dos transdutores nas subestações todas disponíveis, pode não ser economicamente factível fazer a telemetria (WU, 1990).

Diante deste cenário de identificação de estado de operação do centro de operação utiliza-se o Estimador de Estado, sendo este um programa que processa um conjunto redundante de medidas e fornece estimativas para as tensões complexas de

todas as barras do sistema que melhor se adeque a esse conjunto disponível de medições. Sua capacidade de ponderar com diferentes pesos para medidas distintas (de acordo com sua precisão) e de processar erros grosseiros em medidas permite disponibilizar ao operador uma base mais confiável para o monitoramento e controle mais seguro e avançado do sistema (LU; LUI; TENG, 1995). A identificação do estado do sistema para o sistema de distribuição é mais complexa por dispor de poucas informações em tempo real, tendo nos dados disponíveis carência de disponibilidade e confiabilidade (BARAN; KELLEY, 1995), necessitando do EE para lidar com a natureza do sistema.

No entanto, durante o desenvolvimento e testes de diferentes modelos de EE existe a carência de um banco de dados confiáveis, que disponibilize medidas reais e verossímeis com a realidade de um sistema de operação.

Para um EE são requeridos dois tipos de dados: os parâmetros da rede e o conjunto de medições. Para o sistema de transmissão os dados de rede são relativamente balanceados, permitindo um desacoplamento, e portanto que a análise seja toda em sequência positiva, sempre considerando um defasamento entre as fases de 120 graus (LU; LIU; TENG, 1995). Apesar de ter sido demonstrado que a transposição de linhas e múltiplas linhas ocupando uma mesma rota podem causar um desbalanceamento significativo mesmo nas linhas de transmissão (HANSEN; DEBBS, 1995), é na modelagem dos sistemas de distribuição que se encontra o maior problema. Devido a natureza das cargas, que é uma combinação de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas, o sistema não pode ser considerado equilibrado.

Este alto desequilíbrio de cargas na rede de distribuição torna não apenas justificável, mas também necessária a utilização de um modelo trifásico da rede, e tornando o uso de componentes simétricas altamente desaconselhado (LU; LIU; TENG, 1995) devido as diferenças entre as três fases, sendo necessário para um cálculo mais preciso a representação das três fases.

Olhando o cenário de aplicabilidade alta do EE e as evoluções em complexidade em conjunto com expectativas de avanços nos sistemas de medição dos sistemas de distribuição, o presente trabalho evidencia a necessidade de estudos

adicionais desta ferramenta e propõe estudos e desenvolvimentos relacionados ao estimador, sua implementação trifásica, e principalmente um gerador de medidas computacionais que gere medidas verossímeis às disponibilizados pelo sistema elétrico. Tomando como base estudos desenvolvidos no grupo de pesquisa em que esse trabalho está inserido, técnicas de desacoplamento (por sua alta eficiência já amplamente estudada (STOTT; ALSAÇ, 1973)) e de normalização complexa por unidade (cpu) (PORTELINHA; TORTELLI, 2015), são amplamente explorados como discutido no presente documento.

Percebe-se também a carência de um sistema que simule medidas reais, para simulação do EE, que seja aplicado a sistemas monofásicos e trifásicos, para sistemas de transmissão e distribuição. Diferente dos sistemas-teste já consagrados e utilizados em simulações, não existe um banco de dados com medidas reais. Por esta razão, identificou-se nesse trabalho a necessidade do desenvolvimento de um simulador de medidas.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1970 foram publicados os primeiros artigos que introduziram o conceito do estimador de estado. Ainda que tenha sido originado de uma curiosidade matemática, a evolução dos seus estudos tornou a estimação de estado um dos pilares de um centro de controle moderno de um sistema elétrico, atribuindo maior confiabilidade e segurança à rede.

O modelo de rede em tempo real que estava surgindo no final da década de 60 fez com que Schweppe desenvolvesse o estimador de estado, na tentativa de lidar com as muitas incertezas associadas ao cálculo de fluxo de potência. O estimador de estado foi inicialmente apresentado em três artigos, (SCHWEPPE; WILDES, 1970), (SCHWEPPE; ROM, 1970) e (SCHWEPPE, 1970), nos quais iniciou com a natureza do problema, progrediu pela sua solução matemática através de um modelo aproximado e concluiu com a sua implementação através de um algoritmo de uso computacional.

O estimador de estado proposto tinha como objetivo limpar erros de dados medidos e coletados do sistema elétrico pelo Sistema de Aquisição e Supervisão de

Dados (SCADA). Estes dados típicos incluem potência ativa e reativa de fluxos de potência, medidas de injeção de potência ativas e reativas nas barras e tensão nas barras.

O estimador de estados apresentado por Schweppe, que na época era para monitoramento da segurança das redes de transmissão, teve seu conceito adotado de forma imediata. No entanto o método de solução proposto, mínimos quadrados ponderados (WLS), não foi adotado em sua forma original. Uma compilação que parte do estudo do estimador básico WLS, passando pelo estimador desacoplado, estabilidade dos estimadores, processamento de ruídos e estimadores robustos, foi apresentado em (WU, 1990), demonstrando sua rápida expansão.

Na área de fluxo de potência havia sido apresentado o método desacoplado rápido, que se mostrava bastante atrativo por sua alta confiabilidade, alta velocidade de solução e amplo alcance de aplicações. O método é desenvolvido utilizando o desacoplamento existente entre $P-\theta$ e $Q-V$, conforme apresentado em (STOTT; ALSAÇ, 1973).

Em (HORISBERGER; RICHARD; ROSSIER, 1976) é apresentado um novo algoritmo para solução do estimador de estado baseado no WLS, voltado à sistemas elétricos de grande escala. Visando um melhor desempenho, foi utilizado o desacoplamento do fluxo de potência desacoplado rápido para formação da matriz jacobiana, alcançando resultados mais rápidos e requerendo muito menos esforço computacional de armazenamento e processamento.

Para o estimador de estado desacoplado rápido existem dois métodos: o desacoplado no algoritmo e o desacoplado no modelo (referente ao artigo citado anteriormente). Ambos consideram o desacoplamento entre a potência ativa (P) e o módulo da tensão (V) e a potência reativa (Q) e o ângulo de fase (θ), resultando no conhecido desacoplamento $P\theta-QV$. No entanto, o primeiro utiliza-o apenas nas admitâncias, formando uma nova matriz ganho. O segundo é similar, porém atua diretamente na matriz jacobiana, tornando-a constante. Suas diferenças de desempenho são comparadas em (MONTICELLI; GARCIA, 1990), que demonstra que

ambas tem um desempenho similar, porém o desacoplado no algoritmo é mais aconselhado para pequenas razões de X/R .

Além de comparar o desempenho dos dois algoritmos, em (MONTICELLI; GARCIA, 1990) é estudada a eliminação de erros grosseiros. Estes podem passar em uma pré-filtragem e entrar no processo de estimação, trazendo resultados desinteressantes. O modelo matemático proposto por em (MONTICELLI; GARCIA, 1990) utiliza a aproximação não-quadrática e aplica o desacoplamento a esta técnica também, demonstrando que a eliminação de erros grosseiros por generalização de pseudo-medidas se mostra computacionalmente bastante econômico.

Os diferentes tipos de métodos de estimador de estado desacoplado rápido demonstravam diferentes desempenhos quando aplicados a sistemas com ramos de sistemas que apresentavam uma razão X/R crítica. Por esta razão em (MONTICELLI; GARCIA 1990) o desacoplamento não é utilizado para zerar submatrizes, mas sim para resolver em duas etapas às fórmulas de Newton-Raphson completas. Esta nova proposta se mostrou mais robusta em relação à versão padrão apresentada anteriormente, apresentando um comportamento de convergência superior nos casos de baixa razão X/R .

Já em (BARAN; KELLEY, 1995) foi proposto um estimador de estado, baseado no algoritmo WLS, que incluía correntes dos ramos e previsão de demanda para suprir a indisponibilidade de medidas em tempo real em suas variáveis de estado, tornando-os dados a serem processados pelo estimador.

Conforme o monitoramento do sistema elétrico foi evoluindo para tensões menores de circuitos e com a integração do sistema de transmissão, o modelo monofásico representava um modelo muito simplificado. Cargas desequilibradas, admitâncias transpostas em linhas de transmissão, acoplamentos etc. são alguns dos casos em que o método dos componentes simétricos da rede não se mostra eficiente. Em (CHEN; DILLON, 1974) foi proposta uma modelagem trifásica de linhas de transmissão, geradores síncronos e transformadores, utilizando uma modelagem não-simétrica. Utilizando esta modelagem (ARRILLAGA; HARKER, 1978) propõe um cálculo de fluxo de potencia trifásico desacoplado rápido trifásico.

O impacto negativo que o método dos componentes simétricos traz à rede pelo desequilíbrio entre as fases da rede elétrica não se limita ao fluxo de potência, mas também ao estimador de estado. Demonstrando que dependendo do nível de desequilíbrio os erros nos cálculos poderiam ser bastante dramáticos, (HANSEN; DEBBS, 1995) propõe um estimador de estado utilizando o modelo trifásico, trazendo dois benefícios: um modelo de rede mais exato e uma forma do monitoramento em tempo real detectar o desequilíbrio das fases, podendo identificar problemas potenciais como máquinas superaquecidas e operação inapropriada de relés.

Em (ALMEIDA; ASADA; GARCIA, 2006) são discutidos problemas relacionados ao desequilíbrio de fases e acoplamento mútuo em relação ao estimador de estado em modelo simétrico e assimétrico, considerando casos diversos e alternando suas condições. Além de comparar seus resultados também analisou ilhas de observabilidade e estratégias de convergência, mostrando como a análise simétrica no estimador de estado pode negligenciar inúmeras necessidades do sistema.

Uma rede de distribuição é caracterizada por topologias radiais, alto desequilíbrio de fases e quantidade vasta de dados não confiáveis. Desta forma o estimador de estado para um sistema de distribuição em tempo real apresenta novos desafios e características individuais, conforme estudados em (DZAFIC; ABLAKOVIC; HENSELMEYER, 2012). Para tal modelo é necessária análise trifásica radial, com desequilíbrio e rede assimétrica, utilizando potência ativa e reativa, magnitude de corrente e magnitude de tensão.

A evolução e ramificação das áreas de estudo do estimador de estado é altíssima. Estas continuam a progredir, como em (GÖL; ABUR, 2014) que propõe um estimador de estado trifásico robusto baseado em medidas de PMU (do inglês *Phase Measurement Unit*), o qual permite que o problema seja resolvido em três equações menores e sem necessidade de processo iterativo.

Foram propostos outros métodos de modelagem de estimador de estado, como o linear de dois níveis proposto por (YANG; SUN; BOSE, 2011) que utiliza as medidas sincrofasoriais para desenvolver um método linear que funciona como uma transição da rede usual para o “*smartgrid*”. Este também já foi aplicado ao modelo trifásico por (LI;

SUN; WANG; ZHANG; WU, 2011), utilizando o método das correntes de Kirshhoff, permitindo a inclusão de medidas RTU e PMU.

Outras propostas de estimador de estados trifásicos foram apresentadas na literatura contendo abordagens distintas daquelas propostas por este documento, como em (NANCHIAN; MAJUMDAR; PAL, 2017), (KUCHAR; JURSE; ALIC; KANDUS; SVIGELJ, 2016) e (BREDA; VIEIRA; OLSKOVICZ, 2016), que utilizam de ferramentas para que o estimador de estado possa ser aplicado a modelos de distribuição.

Para trabalhar com simulação e testes de qualquer modelo de EE é necessário um conjunto de medidas confiável, que disponibilize tanto as medidas sem erros, quanto com adição de ruídos e erros grosseiros. Foi feito um estudo relacionando os diferentes tipos de erros e a origem de sua medida em (ALBERTINE, 2011), que utiliza destes dados para propor um simulador de medidas.

Estes são alguns dos inúmeros estudos que possibilitam uma revisão bibliográfica para o progresso do estudo deste trabalho, que utilizará dos conhecimentos previamente desenvolvidos para alcançar resultados enriquecedores para a área.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um simulador de medidas trifásico que possa ser aplicado a redes de transmissão e distribuição e apresentar os estudos e desenvolvimento de um estimador de estado trifásico utilizando técnicas de desacoplamento.

1.3.2 Objetivo Específico

- Os objetivos específicos são: Levantar a fundamentação teórica e o estado da arte do objetivo geral, incluindo estimadores de estado trifásicos existentes e estimadores de estado utilizando o método desacoplado rápido.
- Estudar e avaliar a representação trifásica das redes elétricas.

- Desenvolver um simulador de medidas trifásicas para redes de transmissão e distribuição utilizando normalização complexa, com capacidade de geração de ruídos normais e de erros grosseiros.
- Implementar computacionalmente o simulador de medidas trifásico.
- Desenvolver estudos e modelagens de um estimador de estado trifásico, utilizando o método desacoplado rápido.
- Implementar computacionalmente uma versão simplificada do estimador de estados trifásico desacoplado rápido
- Simular e testar a metodologia do simulador de medidas e estimador de estados através de sistemas teste do IEEE para avaliação dos métodos desenvolvidos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em seis capítulos, sendo eles: O Capítulo 1, o qual apresentou a introdução, os objetivos, a justificativa e os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 2, destinado à formulação do problema do fluxo de potência trifásico seus métodos de resolução mais usuais. O Capítulo 3, que apresenta um estudos dos estimadores de estado já consagrados na literatura. O Capítulo 4 apresentará o método do simulador de medidas trifásico e desenvolvimentos iniciais com abordagem do estimador de estado trifásico. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a nova metodologia proposta, por meio de tabelas comparativas, utilizando sistemas-testes em diferentes condições topológicas e operativa, abordando tanto sistemas de transmissão quanto distribuição. O Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho desenvolvido e propostas de trabalhos futuros.

2. FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO

2.1 INTRODUÇÃO

O cálculo de fluxo de carga é a análise de um sistema elétrico de energia com sua topologia e níveis de carga e geração conhecidos, de modelagem estática e com alterações suficientemente lentas para que se possam ignorar os efeitos transitórios. Ele consiste na obtenção do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de algumas outras grandezas de interesse.

Existem diferentes métodos de resolução do fluxo de carga disponíveis, que diferenciam entre armazenamento, velocidade e características de convergência. A resolução do método de fluxo de carga pode ser dividida em dois grupos, os que utilizam o método de Gauss e os que utilizam o método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983). Dentre as análises que utilizam o método de Newton-Raphson, o fluxo de carga desacoplado rápido tem a vantagem de exigir um menor esforço computacional e exige pouca memória (STOTT; ALSAÇ, 1973).

Engenheiros de sistema de potência utilizam largamente uma análise monofásica do sistema para simplificar o problema. Tal análise considera o sistema equilibrado e isto significa que, tirando pelo defasamento de 120 graus entre o ângulo das fases, as três fases têm a mesma tensão, corrente e perfil de fluxo de potência.

Sistemas de distribuição com cargas desequilibradas, sistemas com linhas de transmissão com impedâncias mútuas elevadas e linhas de transmissão sem transposição são algumas formações do sistema elétrico nos quais as análises usuais, que consideram a hipótese de um sistema equilibrado, não têm resultados precisos o bastante.

A modelagem trifásica demanda grande esforço computacional, desta forma para o cálculo de fluxo de carga trifásico o método desacoplado rápido se torna mais adequado para a resolução.

2.2 FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA

O problema de fluxo de carga é formulado pelas Leis de Kirchhoff, considerando a conservação das potências ativas em cada barra do sistema, que são consideradas os nós. Na formulação básica (MONTICELLI, 1983), cada barra da rede está associada a quatro variáveis, sendo que duas serão dados conhecidos e outras duas serão incógnitas, sendo as variáveis:

V_k – magnitude da tensão nodal na barra k

θ_k – ângulo da tensão nodal na barra k

P_k – injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k

Q_k – injeção líquida de potência reativa na barra k

Para uma análise inicial será considerado um sistema equilibrado, utilizando componentes simétricas e considerando a análise monofásica.

As barras são classificadas conforme os dados disponíveis, de forma que são definidas como:

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE BARRAS

Nome da Barra	Notação	Dados	Incógnitas
Barra de Carga	PQ	P_k e Q_k	V_k e θ_k
Barra de Geração	PV	P_k e V_k	θ_k e Q_k
Barra de Referência	V θ	V_k e θ_k	P_k e Q_k

Fonte – MONTICELLI, 1983.

As barras de carga e de geração são abundantes no sistema, no entanto a barra de referência é unitária e escolhida para realizar função de referenciar o ângulo do sistema (tendo a magnitude de tensão do nó terra) e para fechar o balanço do sistema, pois não é possível definir todas as injeções de potência sem conhecer as perdas, e isto é uma função do próprio fluxo de carga.

Para o equacionamento básico do fluxo de carga é utilizada a Primeira Lei de Kirchhoff, considerando que as potências ativas e reativas injetadas em cada barra são iguais as somas dos fluxos que entram e saem da própria barra, podendo ser expresso matematicamente como:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

onde:

$k = 1, \dots, NB$ onde NB é o número de barras da rede

Ω_k – conjunto das barras vizinhas da barra k

V_k, V_m – magnitude das tensões das barras terminais do ramo $k - m$

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$

P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo $k - m$

Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo $k - m$

Q_k^{sh} - componente da injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da

barra k .

A topologia do sistema é descrita pela equação:

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (2.3)$$

E a matriz $[Y]$ é a matriz admitância, obtida pela modelagem do sistema e seus parâmetros.. Desta forma pode-se fazer a formulação matricial do equacionamento básico utilizando as equações das correntes dos nós e definindo as injeções de potência ativa e reativa pelas seguintes equações (MONTICELLI, 1983):

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.4)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.5)$$

Onde:

K – conjunto formado pelos elementos do conjunto Ω_k mais a própria barra k .

2.3 ALGORITMOS BÁSICOS DO FLUXO DE CARGA NÃO-LINEAR

A resolução das fórmulas básicas é dividida basicamente em duas, a por meio de Gauss e pelo método de Newton-Raphson. O método de Newton-Raphson demonstra maior interesse prático e é o que será analisado a seguir.

As fórmulas (2.4) e (2.5), deduzidas pela aplicação da Lei de Kirshhoff, são utilizadas para determinar as incógnitas das barras do sistema. Elas são utilizadas de duas formas, primeiramente para calcular V_k e θ_k e de maneira trivial para o cálculo de P_k e Q_k .

O cálculo de V_k nas barras PQ e PV, e θ_k nas barras PQ são obtidos no chamado subsistema 1, que resulta em um sistema de equações algébricas não lineares (funções quadráticas e trigonométricas) onde as incógnitas aparecem implicitamente (MONTICELLI, 1983).

$$P_k - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (2.6)$$

$$Q_k - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \quad (2.7)$$

O subsistema 2 é a aplicação direta das fórmulas (2.4) e (2.5) para o cálculo de P_k na barra de referência e Q_k para as barras PV e de referência. As incógnitas aparecem de forma explícita, o que torna o processo de resolução trivial.

Reescrevendo o subsistema 1 em forma vetorial podemos agrupar as incógnitas de maneira que:

$$x = \begin{bmatrix} \bar{\theta} \\ \bar{V} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde $\bar{\theta}$ é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e \bar{V} o vetor das magnitudes das tensões das barras PQ.

Considerando a seguinte forma de representar o subsistema 1:

$$\Delta \bar{P} = \bar{P}^{esp} - \bar{P}(\bar{V}, \bar{\theta}) \quad (2.9)$$

$$\Delta \bar{Q} = \bar{Q}^{esp} - \bar{Q}(\bar{V}, \bar{\theta}) \quad (2.10)$$

em que \bar{P} é o vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV, e \bar{Q} é o vetor das injeções de potência reativas na barras PQ.

Assim, podemos reescrever o subsistema 1 da seguinte maneira:

$$\bar{g}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{Q} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.11)$$

2.4 FLUXO DE CARGA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O método de Newton-Raphson consiste em determinar o valor de x para uma função $g(x)$ que se anula, conforme necessidade para determinação do fluxo de carga da equação (2.11).

O método que utiliza de aproximação tangencia da função, e seu algoritmo segue os seguintes passos (MONTICELLI, 1983):

- i) Escolher um valor inicial da solução $x = x^k = x^0$.
- ii) Calcular o valor da função $g(x^k)$ para o valor escolhido
- iii) Comparar o módulo do valor calculado de $g(x^k)$ com o modulo da tolerância ε previamente especificada. Se $g(x^k) \leq \varepsilon$ o algoritmo deve parar, caso contrário deve prosseguir.
- iv) Resolver a função Δx^k , sendo que:

$$\Delta x^k = \frac{-g(x^k)}{g'(x^k)} \quad (2.12)$$

em que $g'(x)$ é a derivada da função $g(x)$.

- v) Definir o novo valor de x através de:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.13)$$

- vi) Fazer $k + 1 \rightarrow k$ e retornar ao passo ii.

Estes passos são todos descritos para um sistema unidimensional, no qual $g(x)$ e x são escalares. Para um sistema n -dimencional de n incógnitas (MONTICELLI, 1983) é possível seguir os mesmos passos, mas algumas alterações devem ser feitas, de forma que (2.11) possa ser definido por:

$$g(\bar{x}) = \begin{bmatrix} g_1(\bar{x}) \\ g_2(\bar{x}) \\ g_3(\bar{x}) \\ \vdots \\ g_n(\bar{x}) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

O vetor de correção Δx^k será calculado como:

$$\bar{g}(\bar{x}^k) + J(\bar{x}^k)\Delta x^k = 0 \quad (2.16)$$

e J é a matriz jacobiana, dada por:

$$J = \frac{\delta \bar{g}}{\delta \bar{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{g}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \bar{g}_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \bar{g}_1}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial \bar{g}_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \bar{g}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \bar{g}_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \bar{g}_2}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial \bar{g}_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \bar{g}_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \bar{g}_3}{\partial x_2} & \frac{\partial \bar{g}_3}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial \bar{g}_3}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \bar{g}_n}{\partial x_1} & \frac{\partial \bar{g}_n}{\partial x_2} & \frac{\partial \bar{g}_n}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial \bar{g}_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

O método de Newton-Raphson na forma matricial é utilizado para a resolução do fluxo de carga, utilizado (2.11) como a função. O ponto central da resolução é a obtenção de Δx^k , que exige a solução do sistema linear (2.16), que pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$\bar{g}(\bar{x}^k) = -J(\bar{x}^k)\Delta x^k \quad (2.18)$$

onde:

$$\bar{g}(\bar{x}^k) = \begin{bmatrix} \Delta \bar{P}^k \\ \Delta \bar{Q}^k \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\Delta x^k = \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta}^k \\ \Delta \bar{V}^k \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$J(\bar{x}^k) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\theta}} & \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{V}} \\ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{\theta}} & \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{V}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

As submatrizes da matriz jacobiana podem ser representadas por:

$$H = \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\theta}} \quad (2.22)$$

$$N = \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{V}} \quad (2.23)$$

$$M = \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{\theta}} \quad (2.24)$$

$$L = \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{V}} \quad (2.25)$$

E (2.18) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}^k \\ \Delta \bar{Q}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta}^k \\ \Delta \bar{V}^k \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Definindo-se a topologia do sistema, modelando-o na matriz impedância $[Y]$ e definindo a tolerância para as potências é possível resolver o problema básico do fluxo de carga utilizando o método do Newton-Raphson, utilizando as fórmulas acima apresentadas e seguindo os passos do algoritmo.

2.5 FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO

A escolha do método computacional para resolução do problema exige uma análise comparativa dos méritos e deméritos de cada um em respeito a armazenamento necessário, velocidade, características de convergência e a relação entre todos estes aspectos com os seus requerimentos computacionais específicos.

O método de Newton-Raphson ganhou popularidade para soluções de rotina, porém era limitado a um núcleo pequeno de aplicações devido alto custo

computacional. O método de Gauss, apesar de mais econômico, não era rápido como métodos que vieram após ele por soluções aproximadas repetitivas.

Foram desenvolvidos métodos desacoplados para melhorar o desempenho do anterior. Um dos métodos propostos que tentavam superar as limitações de seus precedentes foi o método desacoplado rápido, por (STOTT; ALSAÇ, 1973). Eles aproveitaram das propriedades físicas do sistema, considerando um desacoplamento matemático entre P- θ e Q-V nos cálculos. Este desacoplamento considera o fato das sensibilidades $\partial P/\partial \theta$ e $\partial Q/\partial V$ serem normalmente mais intensas que as sensibilidades $\partial P/\partial V$ e $\partial Q/\partial \theta$ em sistemas de transmissão.

O desacoplamento permite que valores atualizados possam ser utilizados dentro da resolução dos subproblemas, pois P- θ e Q-V são resolvidos alternadamente. Os valores atualizados de V são utilizados no subproblema P- θ , e os valores atualizados de θ no subproblema Q-V.

O método de Newton-Raphson é o ponto de início para o desacoplado rápido, aplicando algumas considerações na matriz Jacobiana na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{V} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Ao aplicar o desacoplamento P- θ e Q-V as submatrizes $[N]$ e $[M]$ são negligenciadas, de forma que temos duas equações separadas em (2.27):

$$\Delta \bar{P} = [H] \cdot [\Delta \bar{\theta}] \quad (2.28)$$

$$\Delta \bar{Q} = [L] \cdot [\Delta \bar{V}] \quad (2.29)$$

Fazendo as derivadas referentes às fórmulas das submatrizes $[H]$ e $[L]$, e considerando os elementos de índice km como não diagonais e kk como elementos diagonais das matrizes obtém-se:

$$H_{km} = L_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.30)$$

$$H_{kk} = -B_{kk} V_k^2 - Q_k \quad (2.31)$$

$$L_{kk} = -B_{kk}V_k^2 + Q_k \quad (2.32)$$

Pode-se reescrever as submatrizes $[H]$ e $[L]$ utilizando um artifício cujos resultados apresentam uma convergência mais rápida. Este consiste em chamar de V uma matriz diagonal cujos elementos não-nulos são as magnitudes das tensões das barras PQ do sistema (MONTICELLI, 1983).

$$H = VH' \quad (2.33)$$

$$L = VL' \quad (2.34)$$

onde:

$$H'_{km} = V_m(G_{km}\text{sen}\theta_{km} - B_{km}\text{cos}\theta_{km}) \quad (2.35)$$

$$H'_{kk} = -B_{kk}V_k - \frac{Q_k}{V_k} \quad (2.36)$$

$$L'_{km} = G_{km}\text{sen}\theta_{km} - B_{km}\text{cos}\theta_{km} \quad (2.37)$$

$$L'_{kk} = -B_{kk} + \frac{Q_k}{V_k^2} \quad (2.38)$$

Outras premissas fisicamente justificáveis serão consideradas para as simplificações. Para um sistema elétrico real pode-se considerar que o $\text{cos}\theta_{km}$ é muito próximo de 1, que a magnitude de B_{km} é muito maior a de $G_{km}\text{sen}\theta_{km}$ e que a magnitude de $B_{kk}V_{kk}^2$ é muito maior que a de Q_k . Ou matematicamente:

$$a) \text{cos}\theta_{km} \approx 1$$

$$b) B_{km} \ll G_{km}\text{sen}\theta_{km}$$

$$c) Q_k \ll B_{kk}V_{kk}^2$$

Utilizando as premissas acima com as fórmulas de (2.35) e (2.37) em (2.28) e (2.29) obtém-se a seguinte aproximação:

$$\Delta \bar{P} = [V \cdot B'] \cdot [\Delta \bar{\theta}] \quad (2.39)$$

$$\Delta \bar{Q} = [V \cdot B''] \cdot [\Delta \bar{V}] \quad (2.40)$$

A forma final do desacoplamento apresentado realiza-se com as seguintes considerações:

- i) Omitindo de $[B']$ a representação dos elementos de rede que afetam predominantemente o fluxo de potência reativa, como reatâncias shunt e transformadores defasadores.
- ii) Omitindo de $[B'']$ perdas ativas.
- iii) Dividindo os lados direito e esquerdo das equações (2.39) e (2.40) por v .
- iv) Negligenciando resistências em série no cálculo dos elementos de $[B']$.

Após realizar todas as modificações propostas as equações do cálculo do fluxo de carga desacoplado rápido são:

$$\left[\frac{\Delta \bar{P}}{V}\right] = [B'] \cdot [\Delta \bar{\theta}] \quad (2.41)$$

$$\left[\frac{\Delta \bar{Q}}{V}\right] = [B''] \cdot [\Delta \bar{V}] \quad (2.42)$$

Tanto $[B']$ como $[B'']$ são reais, esparsas e tem a estrutura de $[H]$ e $[L]$, respectivamente. Como elas contem apenas as admitâncias da rede seus valores são constantes e precisam ser calculadas apenas uma vez, no início do estudo.

A melhor maneira de resolver a iteração das equações é alternando os resultados de (2.41) e (2.42). Cada ciclo de iterações compreende uma solução de $[\Delta \bar{\theta}]$ para atualizar $[\bar{\theta}]$, e a solução de $[\Delta \bar{V}]$ para atualizar $[\bar{V}]$. Também devem haver dois critérios de parada, com tolerâncias para o cálculo da potência ativa e de potência reativa.

As simplificações e premissas adotadas no método desacoplado rápido permitem que ele se torne atrativo por ter uma superioridade em velocidade de convergência, confiabilidade, simplicidade e custo computacional em relação ao método de Newton-Raphson. O seu algoritmo, o uso da Jacobiana constante e as separações

das fórmulas permite que este método seja bastante utilizado em outras aplicações (STOTT; ALSAÇ, 1973).

2.6 FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO DESACOPLADO RÁPIDO

O modelo trifásico, conforme visto anteriormente, requer muito mais computacionalmente, em tempo e armazenamento, que o modelo mais usual, que é o monofásico. Desta forma um método mais convencional como o de Newton-Raphson da preferência a um mais eficaz como os algoritmos desacoplados.

Um estudo feito em (ARRILLAGA; HARKER, 1978) implementou técnicas de desacoplamento ao modelo trifásico do sistema para o cálculo de fluxo de carga. Ao fazer as modificações adequadas, desenvolveu um método desacoplado rápido trifásico eficiente, com características similares ao modelo monofásico do método desacoplado rápido monofásico.

A modelagem da rede é feita pelo método das admitâncias compostas. A rede é primeiramente dividida em subsistemas (geradores, transformadores, linhas de transmissão), com a restrição que não pode haver acoplamento entre os diferentes subsistemas.

Seguindo esta restrição as matrizes de admitâncias próprias dos subsistemas podem ser arrançadas de forma que: a) a matriz de admitância própria de qualquer barra é a soma de todas as matrizes de admitância própria na barra, e b) a matriz de admitância mútua entre duas barras é a soma das matrizes individuais de admitância mútua de todos os subsistemas contidos na barra em questão.

Para identificar o estado do sistema (as magnitudes de tensão e os ângulos de fase referentes a elas) de forma que as condições das barras sejam satisfeitas, é preciso que a formulação básica de Newton-Raphson seja adequada, conforme proposto em (STOTT; ALSAÇ, 1973).

Para cada uma das três fases p de cada barra i com carga ou terminal de gerador de um sistema de nb barras:

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)^{esp} - |V|_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 |V|_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}) \quad (2.43)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)^{esp} - |V|_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 |V|_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}) \quad (2.44)$$

onde:

ΔP_i^p – desvio de potência ativa na barra i de fase p

ΔQ_i^p – desvio de potência reativa na barra de fase p

P^{esp} - potência ativa especificada

Q^{esp} – potência reativa especificada

$medida_{ik}^{pm}$ - valor de medida relacionando a barra i de fase p , e a barra k de fase m .

Para cada barra interna de gerador, de um sistema com ng geradores, onde a tensão nodal faz parte de um conjunto trifásico equilibrado, sendo necessária apenas uma equação para a tensão desconhecida e para o ângulo de fase da tensão:

$$\Delta P_{gen.j} = P_{gen.j}^{SP} - \sum_{p=1}^3 |V|_{int.j} \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 |V|_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}) \quad (2.45)$$

$$|V|_{reg.j} = |V|_{term.j}^{esp} - |V|_j^A \quad (2.46)$$

onde:

$\Delta P_{gen.j}$ – desvio de potência ativa do gerador j

$P_{gen.j}^{SP}$ – potência ativa total especificada na saída do gerador j

$|V|_{int.j}$ – magnitude de tensão da barra interna do gerador j

$|V|_{term.j}^{esp}$ – tensão do regulador especificada para os três terminais de tensão do gerador j

A resolução do sistema de equações básica do fluxo de carga trifásico pelo método de Newton-Raphson é expressa pela equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{P}_{gen} \\ \Delta \bar{Q} \\ \Delta |\bar{V}|_{reg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial \bar{P}}{\partial |V|} & \frac{\partial \bar{P}}{\partial |V_{int}|} \\ \frac{\partial \bar{P}_{gen}}{\partial \theta} & \frac{\partial \bar{P}_{gen}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial \bar{P}_{gen}}{\partial |V|} & \frac{\partial \bar{P}_{gen}}{\partial |V_{int}|} \\ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial \bar{Q}}{\partial |V|} & \frac{\partial \bar{Q}}{\partial |V_{int}|} \\ \frac{\partial |\bar{V}|_{reg}}{\partial \theta} & \frac{\partial |\bar{V}|_{reg}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial |\bar{V}|_{reg}}{\partial |V|} & \frac{\partial |\bar{V}|_{reg}}{\partial |V_{int}|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{int} \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \\ \frac{\Delta |V_{int}|}{|V_{int}|} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

E as submatrizes da matriz Jacobiana podem ser representadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{P}_{gen} \\ \Delta \bar{Q} \\ \Delta \frac{|V|_{reg}}{|V|_{int}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E & I & M \\ B & F & J & N \\ C & G & K & P \\ D & H & L & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{int} \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \\ \frac{\Delta |V_{int}|}{|V_{int}|} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

O algoritmo de cálculo é o mesmo que para o método de Newton-Raphson monofásico, com a matriz Jacobiana. A equação (2.48) é resolvida iterativamente para o vetor do lado direito, que tem seus valores atualizados e em seguida a matriz jacobiana é recalculada. O procedimento continua até que o lado esquerdo atinja um valor menor que a tolerância pré-estabelecida.

Como no modelo monofásico, o desacoplamento P- θ e Q-V pode ser aplicado na equação (2.48) de forma a simplificar os cálculos. Da mesma maneira o efeito de $\Delta \theta$ é desconsiderado no cálculo do fluxo da potência reativa e o efeito de ΔV no cálculo do fluxo da potência ativa.

Considerando o desacoplamento pode-se negligenciar as submatrizes $[I]$, $[M]$, $[J]$, $[N]$, $[C]$ e $[G]$. A equação (2.46) possibilita também que as submatrizes $[D]$ e $[H]$ também possam ser desconsideradas (STOTT; ALSAÇ, 1973).

A forma desacoplada da equação (2.48) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{P}_{gen} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E \\ B & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{int} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} \\ \Delta \frac{|V|_{reg}}{|V|_{int}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & P \\ L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta |V|}{|V|} \\ \frac{\Delta |V_{int}|}{|V_{int}|} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Fazendo as derivadas referentes às fórmulas das submatrizes $[A]$, $[B]$, $[E]$ e $[F]$ e considerando $i = 1, nb$ e $j = 1, ng - 1$ (excluindo a barra de referência):

$$A_{ik} = |V|_i^P |V|_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}) \quad (2.51)$$

$$A_{kk} = -B_{kk}^{mm}|V|_k^{m^2} - Q_k^m \quad (2.52)$$

$$B_{jk} = \sum_{p=1}^3 |V|_{int.j} |V|_k^m (G_{jk}^{pm} \text{sen}\theta_{jk}^{pm} - B_{jk}^{pm} \text{cos}\theta_{jk}^{pm}) \quad (2.53)$$

$$E_{il} = \sum_{m=1}^3 |V|_{int.l} |V|_i^p (G_{il}^{pm} \text{sen}\theta_{il}^{pm} - B_{il}^{pm} \text{cos}\theta_{il}^{pm}) \quad (2.54)$$

$$F_{jl} = 0 \quad (2.55)$$

pois o gerador j não tem conexão com a barra interna do gerador l .

$$F_{il} = \sum_{m=1}^3 -B_{il}^{mm}|V|_l^{m^2} - Q_l^k + \sum_{m=1}^3 \sum_{p=1}^3 |V|_{int.l} |V|_{int.l} (G_{il}^{pm} \text{sen}\theta_{il}^{pm} - B_{il}^{pm} \text{cos}\theta_{il}^{pm}) \quad (2.56)$$

Fazendo as derivadas referentes às fórmulas das submatrizes $[K]$, $[L]$, $[P]$ e $[R]$ e considerando $i = 1 \dots nb$ e $j = 1 \dots ng$:

$$K_{ik} = |V|_k^m |V|_i^p (G_{ik}^{pm} \text{sen}\theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \text{cos}\theta_{ik}^{pm}) \quad (2.57)$$

$$K_{kk} = -B_{kk}^{mm}|V|_k^{m^2} + Q_k^m \quad (2.58)$$

$$L_{jk} = -|V|_k \quad (2.59)$$

onde k é a barra terminal do gerador j , pois em outro caso:

$$L_{jk} = 0 \quad (2.60)$$

$$P_{il} = |V|_{int.l} \sum_{m=1}^3 |V|_i^p (G_{il}^{pm} \text{sen}\theta_{il}^{pm} - B_{il}^{pm} \text{cos}\theta_{il}^{pm}) \quad (2.61)$$

$$R_{jl} = 0 \quad (2.62)$$

A base do algoritmo do fluxo de carga desacoplado rápido é o uso da matriz jacobiana constante. Aproximações similares àsquelas usadas no modelo monofásico são consideradas no modelo trifásico:

- i) Em todos os nós $Q_k^m \ll B_{kk}^{mm}|V|_k^{m^2}$.

- ii) Entre nós conectados de mesma fase $G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \ll B_{kk}^{mm}$ e $\cos \theta_{ik}^{mm} \approx 1$,
onde $\theta_{ik}^{pm} = \pm 120^\circ$ para $m \neq p$.

A consideração do ângulo entre as fases ser equilibrado é feita apenas para simplificar os cálculos e tornar matriz jacobiana constante. Ele não deve ser confundido com o real ângulo entre as fases, pois calcular o defasamento faz parte do objetivo do algoritmo do fluxo de carga trifásico.

Aplicando as simplificações nas equações (2.49) e (2.50) obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{P}_{gen} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V|_i^p M_{ik}^{pm} |V|_k^m & \sum_{m=1}^3 |V|_{int.l} M_{il}^{pm} |V|_i^p \\ \sum_{p=1}^3 |V|_{int.j} M_{jk}^{pm} |V|_k^m & \sum_{m=1}^3 \sum_{p=1}^3 |V|_{int.l} M_{jl}^{pm} |V|_{int.l}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{int} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} \\ \Delta |\bar{V}|_{reg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V|_i^p M_{ik}^{pm} |V|_k^m & \sum_{m=1}^3 |V|_{int.l} M_{il}^{pm} |V|_i^p \\ L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta |\bar{V}|}{|\bar{V}|} \\ \frac{\Delta |\bar{V}_{int}|}{|\bar{V}_{int}|} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

onde $M_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}$

Todos os termos de $[M]$ são constantes, e seus valores são dados pelos ângulos: $\theta_{kk}^{mm} = 0$, $\theta_{ik}^{mm} = 0$ e $\theta_{ik}^{pm} = \pm 120^\circ$ para $m \neq p$.

Continuando com alterações nas equações (2.63) e (2.64).

- i) As junções do lado esquerdo são redefinidas como $[\Delta \bar{P}/|\bar{V}|]$, $[\Delta \bar{P}_{gen}/|\bar{V}|_{int.l}]$ e $[\Delta \bar{Q}/|\bar{V}|]$
- ii) Na equação (2.63) os termos $|\bar{V}|$ passaram a ser considerados 1 p.u., removendo assim a influência da potência reativa no cálculo do ângulo das fases.
- iii) Na equação (2.64), os termos $|\bar{V}|$ restantes são cancelados com seu correspondente no lado direito esquerdo da equação.

Resultando em:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \bar{P}}{|\bar{V}|} \\ \frac{\Delta \bar{P}_{gen}}{|\bar{V}|_{int.l}} \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{int} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \bar{Q}}{|\bar{V}|} \\ \frac{\Delta |\bar{V}|_{reg}}{|\bar{V}|_{int,l}} \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta |\bar{V}| \\ \Delta |\bar{V}_{int}| \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

onde:

$$[B'] = \begin{bmatrix} M_{ik}^{pm} & \sum_{m=1}^3 M_{il}^{pm} \\ \sum_{p=1}^3 M_{jk}^{pm} & \sum_{m=1}^3 M_{jl}^{pm} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$[B''] = \begin{bmatrix} M_{ik}^{pm} & \sum_{m=1}^3 M_{il}^{pm} \\ L'' & 0 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Em que $[B']$ e $[B'']$ são as matrizes jacobianas aproximadas constantes.

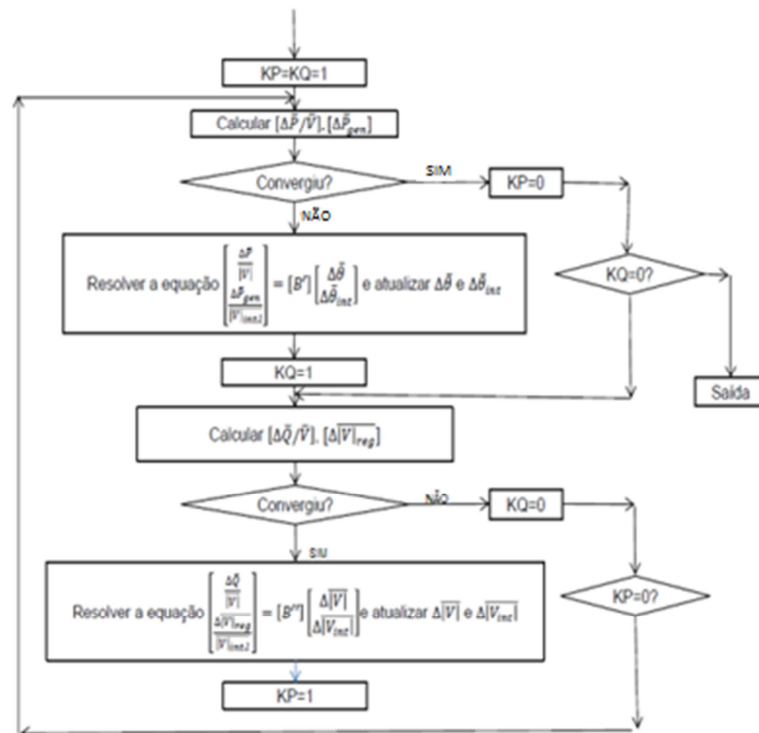
As duas equações (2.65) e (2.66) serão calculadas separadamente, como no modelo monofásico, com o resultado atualizado de uma sendo utilizado no cálculo da outra.

No cálculo desacoplado rápido os valores de $[V]$ são considerados independentes da superfície multidimensional criada por $[\Delta \bar{P}/\bar{V}]$. Isto não está estritamente correto, pois o valor alterável de $[V]$ vai definir posteriormente a superfície $[\Delta \bar{P}/\bar{V}]$.

Cada uma das duas fórmulas tem seu próprio critério de parada, podendo estes ser diferentes. É possível que uma das equações seja finalizada enquanto a outra continua no processo iterativo.

O fluxograma do processo iterativo é representado na Figura 1.

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA FLUXO DE CARGA DESACOPLADO TRIFÁSICO



Fonte: adaptado pelo autor (2017)

Em (STOTT; ALSAÇ, 1973) o algoritmo foi testado em um sistema teste, para diferentes tipos de acoplamento, cargas equilibradas e desequilibradas, operação equilibrada e desequilibrada, modelo realístico do gerador entre outras condições.

A análise apresentada mostra que para sistemas equilibrados os resultados são similares ao serem feitos utilizando modelo trifásico e monofásico. Porém ao ser aplicado em um sistema desequilibrado a convergência e o resultado obtidos são distintos, tendo um melhor desempenho no modelo trifásico, onde a convergência é alcançada até em casos mais extremos de desequilíbrio.

O modelo de fluxo de carga desacoplado rápido apresenta uma alto desempenho comparado ao modelo convencional de Newton-Raphson. Apesar disso, alterações significativas tiveram que ser realizadas no algoritmo entre o modelo monofásico e o modelo trifásico. O modelo trifásico apresenta uma convergência rápida e confiável, tornando-o diferenciado em situações de desequilíbrio da rede (STOTT; ALSAÇ, 1973).

3. ESTIMAÇÃO DE ESTADO

3.1 INTRODUÇÃO

O modelo em tempo real é uma representação matemática computacional da condição atual da rede elétrica e é usado para melhorar a segurança e confiabilidade do sistema elétrico. O modelo é extraído durante intervalos, com “capturas instantâneas” de medidas em tempo reais (medidas analógicas como fluxo de potência, injeção de potência, magnitude de tensão, ângulos de fase magnitude de corrente e o status de dispositivos de chaveamento) e também de medidas estáticas da rede (configurações básicas e parâmetros).

As medidas do sistema real são coletadas em um sistema pelo Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*), porém estas medidas de telemetria podem conter erros. Os erros podem surgir de calibrações imprecisas de equipamentos de medição, dos efeitos da conversão analógico-digital, ruídos nos canais de comunicação, desequilíbrio de fases, etc

Fred Schweppe propôs em (SCHWEPPE; WILDES, 1970), (SCHWEPPE; ROM, 1970) e (SCHWEPPE, 1970) o estimador de estado. Este é um modelo matemático desenvolvido para lidar com as incertezas associadas à tentativa de fazer um cálculo de fluxo de carga on-line em um sistema que utiliza medidas de telemetria em tempo real. O estimador de estado proposto contempla um processador de topologia da rede e tem como função produzir um modelo e um conjunto de dados mais confiáveis para subsidiar a operação dos sistemas elétricos.

O estimador de estado se utiliza da redundância de um conjunto de medidas, que corresponde a situação onde estão disponíveis mais medidas do que as necessárias para determinar o estado da rede, para realizar um processamento estatístico e promover a identificação e correção de erros de medição. Os resultados obtidos fornecem informações mais confiáveis do estado de operação do sistema elétrico e de seus componentes, as quais subsidiam outras aplicações como avaliação de segurança e controle, despacho econômico, etc.

3.2 ESTIMADOR DE ESTADO CONVENCIONAL

O estimador de estado típico contém diferentes funções, dentre elas: processar topologias, reunindo o estado das chaves e disjuntores do sistema; analisar a observabilidade, determinando se o estado do sistema pode ser determinado a partir das medidas disponíveis; solucionando a estimação de estado, ao determinar a estimação ótima do estado do sistema; detectar erros grosseiros no conjunto de medidas; processar parâmetros e erros estruturais da rede (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004). No entanto, sua principal utilidade é filtrar dados redundantes, eliminar medidas incorretas e produzir uma estimativa confiável do estado do sistema a partir da determinação das tensões complexas em todas as suas barras (MONTICELLI, 1999).

Para realizar as tarefas descritas acima o estimador de estado processa um conjunto de variáveis de medida. Estas variáveis se baseiam em combinações de medidas do seguinte tipo:

- (a) Magnitude de tensão V_k na barra k .
- (b) Ângulo de tensão θ_k barra k .
- (c) Fluxo de potência ativa P_{km} no ramo km .
- (d) Fluxo de potência reativa Q_{km} no ramo km .
- (e) Injeção de potência ativa P_k na barra k .
- (f) Injeção de potência reativa Q_k na barra k .
- (g) Módulo da magnitude da corrente $|I_{km}|$ no ramo km .

Todas as medidas podem ser calculadas e estão relacionadas às variáveis de estado \bar{x} , que são os elementos magnitude de tensão e ângulos de fases de todas as barras do sistema.

$$\bar{x} = (\bar{\theta}, \bar{V}) \quad (3.1)$$

Considerando uma medida qualquer z , pode-se considerar que ela é a soma do valor verdadeiro de sua grandeza z_o somada a um erro de medição η , de forma que:

$$z = z_o + \eta \quad (3.2)$$

O problema da estimação de estado pode ser formulado matematicamente partindo da premissa básica de (3.2), para um sistema de Nb barras, m medidas, n variáveis de estado e topologia e parâmetros conhecidos, de forma que (MONTICELLI, 1999):

$$\bar{z} = \bar{h}(\bar{x}) + \bar{e} \quad (3.3)$$

onde:

\bar{z} – vetor de m medidas do sistema, de dimensão $(mx1)$

\bar{x} – vetor das variáveis de estado do sistema, de dimensão $(nx1)$, sendo $n < m$

$\bar{h}(\bar{x})$ – vetor função não-linear que relaciona as medidas aos estados, de dimensão $(mx1)$.

\bar{e} – vetor de erros de medidas, de dimensão $(mx1)$.

3.3 PROBLEMA DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O modelo matemático do estimador de estado é baseado nas relações matemáticas entre as medidas e as variáveis de estado, que correspondem as tensões complexas (módulo e ângulo) em todas as barras. O problema matemático básico do estimador de estado envolve a resolução de um sistema com uma quantidade m de equações para n incógnitas.

Para solucionar este problema será estudado o método dos mínimos quadrados, que provê uma solução para sistema de equações lineares com mais equações do que incógnitas do tipo:

$$\bar{A}\bar{x} = \bar{b} \quad (3.4)$$

Sendo \bar{x} o vetor de incógnitas de dimensão n e \bar{b} um vetor de dimensão n , em que $n < m$ e \bar{A} é uma matriz de dimensão (mxn) .

A solução do sistema (3.4) pelo método dos mínimos quadrados é encontrar o vetor x minimizando o índice $J(x)$ definido por:

$$J(\bar{x}) = (\bar{b} - \bar{A}\bar{x})'(\bar{b} - \bar{A}\bar{x}) \quad (3.5)$$

De forma que:

$$J(x) = \min_{\bar{x}} \bar{r}'\bar{r} \quad (3.6)$$

para o vetor resíduo r :

$$\bar{r} = \bar{b} - \bar{A}\bar{x} \quad (3.7)$$

Para a minimização a primeira condição de otimalidade deve ser satisfeita, ou seja, a derivada de primeira ordem do índice $J(x)$ igualado a zero, para determinar sua condição ótima. A partir desta encontra-se que o problema é solucionado com:

$$\bar{x} = (\bar{A}'\bar{A})^{-1}\bar{A}'\bar{b} \quad (3.8)$$

Sendo a matriz ganho \bar{G} e a pseudo inversa da matriz \bar{A} definidos por:

$$\bar{G} = \bar{A}'\bar{A} \quad (3.9)$$

$$\bar{A}' = (\bar{A}'\bar{A})^{-1}\bar{A}' \quad (3.10)$$

3.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

A equação não-linear que relaciona as medidas e o estado verdadeiro do sistema é (3.3), conforme apresentada anteriormente.

Assume-se que o vetor de erro das medidas \bar{e} apresenta distribuição normal e as medidas de erro são independentes, ou seja (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004):

- $E(e_i) = 0, i = 1, \dots, m$
- $cov(e) = E[e \cdot e^T] = \bar{R}$

onde R é a matriz diagonal da covariância

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Utilizando a teoria dos mínimos quadrados ponderados, e considerando as equações (3.3) e (3.5) o problema da estimação de estado pode ser formulado como a minimização da seguinte função objetivo (MONTICELLI, 1999).

$$\bar{J}(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} \quad (3.12)$$

$$\bar{J}(x) = [\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})]^T R^{-1} [\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})] \quad (3.13)$$

Seguindo a condição necessária de otimalidade, tem-se:

$$g(\bar{x}) = \frac{\partial J(\bar{x})}{\partial \bar{x}} = -\bar{H}^T(\bar{x}) R^{-1} [\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})] = 0 \quad (3.14)$$

onde $\bar{H}(\bar{x})$ é a matriz jacobiana definida por:

$$\bar{H}(\bar{x}) = \frac{\partial J(\bar{x})}{\partial \bar{x}} \quad (3.15)$$

Expandindo a função não-linear $g(\bar{x})$ na série de Taylor no vetor de estado \bar{x}^k obtém-se:

$$g(\bar{x}) = g(\bar{x}^k) + \bar{G}(\bar{x}^k)(\bar{x} - \bar{x}^k) + \dots = 0 \quad (3.16)$$

Negligenciando os termos de maior ordem encontra-se uma solução iterativa conhecida como método de Gauss-Newton, mostrado a seguir:

$$\bar{x}^{k+1} = \bar{x}^k - [\bar{G}(\bar{x}^k)]^{-1} g(\bar{x}^k) \quad (3.17)$$

onde:

k – índice de iteração

\bar{x}^k – vetor de solução da iteração k

$$\bar{G}(\bar{x}^k) = \frac{\partial J(\bar{x})}{\partial \bar{x}} = \bar{H}^T(\bar{x}^k) \bar{R}^{-1} \bar{H}(\bar{x}^k) \quad (3.18)$$

$$g(\bar{x}^k) = -\bar{H}^T(\bar{x}^k) \bar{R}^{-1} [\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})] \quad (3.19)$$

A matriz $\bar{G}(\bar{x}^k)$ é chamada matriz ganho. Ela é estruturalmente e numericamente esparsa, em geral é uma matriz definida não-negativa, todos os seus auto-valores são não-negativos. É definida positiva para redes totalmente observáveis.

Tipicamente esta matriz não é invertida, devido as grandes dimensões do problema, ao invés disso é decomposta em fatores triangulares e o seguinte conjunto de equações lineares é resolvido utilizando substituição direta/inversa em cada iteração k :

$$\bar{G}(\bar{x}^k)\Delta\bar{x}^{k+1} = \bar{H}^T(\bar{x}^k)\bar{R}^{-1}[\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})] \quad (3.20)$$

onde:

$$\Delta\bar{x}^{k+1} = \bar{x}^{k+1} - \bar{x}^k \quad (3.21)$$

A resolução do método dos mínimos quadrados ponderados pela equação (3.20) exige uma solução iterativa. O vetor inicial é chamado \bar{x}^0 , e geralmente, como na solução do fluxo de potência, é feito com a partida plana (*flat start*), na qual todas as tensões das barras são consideradas 1.0 p.u, e em fase.

O algoritmo da solução pode ser resumido nos seguintes passos (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004):

- (a) Inicializar iterações, com o índice $k = 0$.
- (b) Inicializar o vetor de estado \bar{x}^k , tipicamente com partida plana.
- (c) Calcular a matriz ganho $G(\bar{x}^k)$.
- (d) Calcular o lado direito da equação $\bar{H}^T(\bar{x}^k)\bar{R}^{-1}[\bar{z} - \bar{h}(\bar{x})]$
- (e) Decompor $G(\bar{x}^k)$ e resolver por $\Delta\bar{x}^k$.
- (f) Testar a convergência, utilizando uma tolerância previamente especificada ε , de forma que $\max|\Delta\bar{x}^k| \leq \varepsilon$.
- (g) Caso não atenda, atualizar $\Delta\bar{x}^{k+1} = \bar{x}^{k+1} - \bar{x}^k$ e voltar ao passo (c). Se atender, pare.

O algoritmo acima envolve para cada iteração k os cálculos do vetor de função das medidas $\bar{h}(\bar{x})$ e a construção da jacobiana $\bar{H}(\bar{x})$.

3.5 ESTIMADORES DESACOPLADOS

Os principais custos computacionais associados ao estimador de estado com método dos mínimos quadrados ponderados, apresentado anteriormente, consiste na determinação e processamento (triangularização) da matriz ganho a cada iteração.

A literatura demonstra que a matriz ganho não varia muito do ponto de partida até a convergência, incluindo o caso em que se adote a partida plana. Portanto em uma implementação prática, os mesmos fatores da matriz ganho podem ser usados para todas as iterações, com pouca perda de velocidade de convergência e confiabilidade e com uma economia considerável na construção e ao triangulará-la. (GARCIA, ABREU, 1979).

Conforme já observado nos cálculos de fluxo de carga, para sistemas de transmissão, a sensibilidade da potência ativa entre a magnitude de tensão, e da potência reativa entre o ângulo de fase das barras, é muito pequena. Utilizando o conceito de desacoplamento P- θ e Q-V, como no fluxo de carga desacoplado rápido, é possível aliviar mais ainda os custos computacionais do estimador de estado.

Para a formulação de um método de estimador de estado desacoplado baseado no mínimo quadrados ponderados é preciso separar as medidas em duas partes: as medidas ativas \bar{z}_p , que incluem os fluxos de potência ativa \bar{p} e injeções de potência ativa \bar{t} , e as medidas reativas \bar{z}_q , referentes ao fluxo de potência reativa \bar{q} , injeção de potência reativa \bar{u} e a magnitude de tensão \bar{V} nas barras.

O vetor de medidas pode ser separado como (Monticelli, 1999):

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} \bar{z}_p \\ \bar{z}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{t} \\ \bar{p} \\ \bar{u} \\ \bar{q} \\ \bar{V} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Aplicando um particionamento similar ao problema básico do estimador de estado (3.3):

$$\begin{bmatrix} \bar{z}_p \\ \bar{z}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{h}_p(\bar{x}) \\ \bar{h}_q(\bar{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{e}_p \\ \bar{e}_q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Considerando as submatrizes covariâncias nos erros de medição associadas as medidas ativas e reativas tem-se:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \bar{R}_P & 0 \\ 0 & \bar{R}_Q \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A matriz jacobiana pode ser reescrita como:

$$\bar{H}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & \bar{H}_{PV} \\ \bar{H}_{Q\theta} & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

sendo as submatrizes da jacobiana $\bar{H}(\bar{x})$:

$$[\bar{H}_{P\theta}] = \frac{\partial \bar{h}(\bar{x})_p}{\partial \bar{\theta}} \quad (3.26)$$

$$[\bar{H}_{PV}] = \frac{\partial \bar{h}(\bar{x})_p}{\partial \bar{V}} \quad (3.27)$$

$$[\bar{H}_{Q\theta}] = \frac{\partial \bar{h}(\bar{x})_q}{\partial \bar{\theta}} \quad (3.28)$$

$$[\bar{H}_{QV}] = \frac{\partial \bar{h}(\bar{x})_q}{\partial \bar{V}} \quad (3.29)$$

Diferentes métodos de estimação de estado desacoplados foram desenvolvidos (WU, 1990), sendo duas as mais significativas diferenças. O primeiro é o estimador de estado desacoplado no modelo, que negligências as submatrizes da jacobiana, de acordo com o desacoplamento P- θ e Q-V. O segundo é o estimador de estado desacoplado no algoritmo, que trata o desacoplamento como um procedimento de dois passos para resolver o método de Newton-Raphson completo.

3.6 ESTIMADOR DESACOPLADO NO MODELO

O estimador de estado desacoplado no modelo, proposto em (HORISBERGER; RICHARD; ROSSIER, 1976), é uma variável confiável do modelo de estimador de estado mínimo dos quadrados ponderados, porém mais rápido e requer menos armazenamento computacional.

O algoritmo é uma combinação do desacoplamento P- θ e Q-V e de uma matriz ganho constante, com sua solução obtida ao intercalar iterações das partes ativas e reativas das equações não-lineares, similarmente ao método usado no fluxo de carga desacoplado rápido.

O método parte das separações vistas anteriormente, em que as matrizes são separadas entre seus elementos ativos e reativos. Em (3.25), os elementos das submatrizes $\bar{H}_{P\theta}$ e \bar{H}_{QV} são geralmente muito maiores que os de \bar{H}_{PV} e $\bar{H}_{Q\theta}$, respectivamente. Consequentemente, os últimos termos serão negligenciados (HORISBERGER; RICHARD; ROSSIER, 1976) e os termos não diagonais da matriz são eliminados, de forma que:

$$\bar{H}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Isto também elimina os elementos não diagonais da matriz ganho, tornando-a constante e desacoplada. Considerando a magnitude de tensão 1.0. e as diferenças entre os ângulos de fase 0 na reestruturação das matrizes, tem-se:

$$\bar{G}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{G}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{G}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\bar{G}_{P\theta} = H_{P\theta}^T(\bar{x}^k) R_P^{-1} H_{P\theta}(\bar{x}^k) \quad (3.32)$$

$$\bar{G}_{QV} = H_{QV}^T(\bar{x}^k) R_Q^{-1} H_{QV}(\bar{x}^k) \quad (3.33)$$

Repetem-se as mesmas aproximações feitas na matriz Jacobiana quando calculado o vetor do lado direito:

$$\bar{T}_{P\theta} = \bar{H}_{P\theta}^T(\bar{x}^k) \bar{R}_P^{-1} \Delta \bar{z}'_p \quad (3.34)$$

$$\bar{T}_{QV} = \bar{H}_{QV}^T (\bar{x}^k) \bar{R}_Q^{-1} \Delta \bar{z}'_q \quad (3.35)$$

onde:

$$\Delta \bar{z}'_p = \frac{\Delta \bar{z}_p}{V} \quad (3.36)$$

$$\Delta \bar{z}'_q = \frac{\Delta \bar{z}_q}{V} \quad (3.37)$$

$$\Delta \bar{z}_p = \bar{z}_p - \bar{h}_p(\bar{x}) \quad (3.38)$$

$$\Delta \bar{z}_q = \bar{z}_q - \bar{h}_q(\bar{x}) \quad (3.39)$$

O estado do sistema $(\bar{\theta}, \bar{V})$ é obtido pelas equações (3.34) e (3.35) intercaladas durante a iteração. O algoritmo deste modelo pode ser representado nos passos abaixo (MONTICELLI, 1999):

- (a) Inicializar todas as tensões de barra em partida plana, com $\bar{V} = 1$ e $\bar{\theta} = 0$.
- (b) Construir e decompor as matrizes $\bar{G}_{P\theta}$ e \bar{G}_{QV} .
- (c) Calcular $T_{P\theta}$.
- (d) Resolver $\bar{G}_{P\theta} \Delta \bar{\theta} = \bar{T}_{P\theta}$.
- (e) Checar se ambos $\Delta \bar{V}$ e $\Delta \bar{\theta}$ são menores que a tolerância de convergência.
Se sim, pare. Se não, continuar.
- (f) Atualiza $\bar{\theta}^{k+1} = \bar{\theta}^k + \Delta \bar{\theta}$.
- (g) Calcular T_{QV} .
- (h) Resolver $\bar{G}_{QV} \Delta \bar{V} = \bar{T}_{QV}$.
- (i) Checar se ambos $\Delta \bar{V}$ e $\Delta \bar{\theta}$ são menores que a tolerância de convergência.
Se sim, pare. Se não, continuar.
- (j) Atualiza $\bar{V}^{k+1} = \bar{V}^k + \Delta \bar{V}$.
- (k) Ir para passo (c).

As submatrizes ganho $\bar{G}_{P\theta}$ e \bar{G}_{QV} são computadas e decompostas somente no início da solução iterativa. As soluções para $\Delta \bar{\theta}$ e $\Delta \bar{V}$ são realizadas muito efetivamente desde que a triangulação não precise ser feita a cada iteração. A dimensão das duas

submatrizes ganho é metade do tamanho da matriz ganho completa, reduzindo muito o custo computacional.

Existem também variantes da solução básica apresentada, que são basicamente mudanças nas submatrizes $\bar{H}_{p\theta}$ e \bar{H}_{qv} . Conforme apresentados em (AMERONGEN, 1989) e (MONTICELLI, 1999), as chamadas versões XB e BX ignoram ramos de resistência em série ao modelar ao $\bar{H}_{p\theta}$ e \bar{H}_{qv} respectivamente.

O estimador de estado desacoplado rápido no modelo mostrou grande aceitação na literatura, pois ao ser comparado com a versão completa do algoritmo do método dos mínimos quadrados ponderados requer menos memória e é computacionalmente mais rápido, pelas submatrizes menores.

No entanto, deve ser observado que ao ser aplicado a alguns parâmetros de rede não atinge a convergência. Medidas de ramos de magnitude de corrente também não tem o mesmo tipo de propriedades de desacoplamento como as outras medidas, sendo então o método aqui descrito limitado para estes casos.

Para casos em que necessitam de um algoritmo mais robusto, como para sistemas de relação x/r críticos, o método proposto por (MONTICELLI; GARCIA, 1990) de estimador de estado desacoplado rápido no algoritmo é mais indicado.

A necessidade de estimadores de estado com um método computacional mais eficiente e menos sensível aos parâmetros de linha fez com que estudos como (BARAN; KELLEY, 1995) propusessem um estimador de estado baseados em ramos de corrente para sistemas de distribuição fossem desenvolvidos. Nele o problema do estimador de estado é desacoplado em três subproblemas, um para cada fase, por uma regra simples baseada no método de redução de rede de alimentação e que mantém uma boa precisão.

3.7 ESTIMADOR DESACOPLADO NO ALGORÍTMO

A formulação do estimador de estado desacoplado apresentado anteriormente se apresenta na literatura com diferentes versões (tais como BX, XB, associadas a desconsideração das resistências séries dos ramos) e dois modelos distintos: desacoplado no modelo e desacoplado no algoritmo. Estes apresentam resultados

distintos, podendo inclusive não convergir quando aplicados a sistemas com ramos que apresentam razão X/R críticos.

Em (MONTICELLI; GARCIA, 1990) é proposto um método que, contrário ao anterior, não negligência os acoplamentos nas submatrizes $\bar{H}_{P\theta}$ e \bar{H}_{QV} da jacobiana. Ele trata o desacoplamento como um procedimento de dois passos para resolução total do método de Newton-Raphson utilizado no método dos mínimos quadrados ponderados.

O método utiliza a separação das matrizes em ativa e reativa em (3.23), (3.24) e (3.25).

No método de Newton-Raphson aplicado ao problema do estimador de estado para definir $\Delta\bar{\theta}$ e $\Delta\bar{V}$ tem-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & \bar{H}_{PV} \\ \bar{H}_{Q\theta} & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\theta} \\ \Delta\bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{z}_p \\ \Delta\bar{z}_q \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Assume-se então que as matrizes pseudo-inversas da submatriz jacobiana $\bar{H}_{P\theta}$ e \bar{H}_{QV} são respectivamente:

$$\bar{H}_{P\theta}^l = [\bar{H}'_{P\theta} \bar{H}_{P\theta}]^{-1} \bar{H}'_{P\theta} \quad (3.41)$$

$$\bar{H}_{QV}^l = [\bar{H}'_{QV} \bar{H}_{QV}]^{-1} \bar{H}'_{QV} \quad (3.42)$$

Pré-multiplicando $\Delta\bar{z}_p$ na equação (3.40) por $-\bar{H}_{P\theta} \bar{H}_{P\theta}^l$ e somando o resultado a $\Delta\bar{z}_q$, terem-se o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & \bar{H}_{PV} \\ 0 & \tilde{\bar{H}}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\theta} \\ \Delta\bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{z}_p \\ \Delta\tilde{\bar{z}}_q \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

onde:

$$\tilde{\bar{H}}_{QV} = \bar{H}_{QV} - \bar{H}_{Q\theta} \bar{H}_{P\theta}^l \bar{H}_{PV} \quad (3.44)$$

$$\tilde{\bar{z}}_q = \bar{z}_q - \bar{H}_{Q\theta} \bar{H}_{P\theta}^l \bar{z}_p \quad (3.45)$$

Os sistemas (3.40) e (3.41) são equivalentes, logo os vetores de solução são exatamente os mesmo para ambos. Fazendo mais alterações em (3.41) obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\theta} \\ \Delta\bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{\bar{z}}_p \\ \Delta\bar{\bar{z}}_q \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

onde:

$$\bar{\bar{z}}_p = \bar{z}_p - \bar{H}_{PV} \bar{H}_{QV}^L \bar{z}_q \quad (3.47)$$

Com uma série de operações similares as feitas para obter-se (3.46), encontra-se a versão desacoplada dual:

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{H}}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\theta} \\ \Delta\bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{\bar{z}}_p \\ \Delta\bar{\bar{z}}_q \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

onde:

$$\bar{\bar{H}}_{P\theta} = \bar{H}_{PV} - \bar{H}_{PV} \bar{H}_{QV}^L \bar{H}_{Q\theta} \quad (3.49)$$

$$\bar{\bar{z}}_p = \bar{z}_p - \bar{H}_{PV} \bar{H}_{QV}^L \bar{z}_q \quad (3.50)$$

$$\bar{\bar{z}}_q = \bar{z}_q - \bar{H}_{Q\theta} \bar{H}_{P\theta}^L \bar{\bar{z}}_p \quad (3.51)$$

Os sistemas (3.46) e (3.48) podem ser resolvidos pelo algoritmo primal/dual, respectivamente. Ambos são similares na resolução. O algoritmo primal é:

(a) Computar a correção de ângulo intermediária:

$$\Delta\bar{\theta}_{inter} = \bar{H}_{P\theta}^L \Delta\bar{\bar{z}}_p \quad (3.52)$$

(b) Computar as correções da magnitude da tensão:

$$\Delta\bar{\bar{z}}_q = \Delta\bar{z}_q - \bar{H}_{Q\theta} \Delta\bar{\theta}_{inter} \quad (3.53)$$

(c) Computar as correções do ângulo complementar:

$$\Delta \bar{\theta}_{com} = -\bar{H}_{P\theta}^l \bar{H}_{PV} \Delta \bar{V} \quad (3.54)$$

$$\Delta \bar{\theta} = \Delta \bar{\theta}_{inter} + \Delta \bar{\theta}_{com} \quad (3.55)$$

A resolução do algoritmo dual para a equação (3.48) é:

(a) Computar a correção da magnitude de tensão:

$$\Delta \bar{V}_{inter} = \bar{H}_{QV}^l \Delta \bar{z}_q \quad (3.56)$$

(b) Computar correções de ângulo:

$$\Delta \bar{z}_p = \Delta \bar{z}_p - \bar{H}_{PV} \Delta \bar{V}_{inter} \quad (3.57)$$

$$\Delta \bar{\theta} = \bar{H}_{QV}^l \Delta \bar{z}_q \quad (3.58)$$

(c) Computar as correções da magnitude de tensão complementar:

$$\Delta \bar{V}_{com} = -\bar{H}_{QV}^l \bar{H}_{Q\theta} \Delta \bar{V}_{inter} \quad (3.59)$$

$$\Delta V = \Delta \bar{V}_{inter} + \Delta \bar{V}_{com} \quad (3.60)$$

Apesar do algoritmo primal/dual solucionar as equações (3.46) e (3.48) eles não são implementados na prática, pois não utiliza a atualização intermediária das variáveis de estado, como nos outros métodos desacoplados, pela correção de ângulo e magnitude de tensão ser em duas etapas e pela necessidade da inversão completa das submatrizes da jacobiana $\bar{H}_{P\theta}$ e \bar{H}_{QV} . No entanto, este modelo tem propriedades que permitem simplificar o algoritmo primal/dual se tornando de fácil implementação.

O algoritmo primal passa a ser:

Repetir até que a convergência seja atendida, com as tolerâncias atendidas:

(a) Realizar iteração $P\theta$:

$$\Delta \bar{\theta}^k = \bar{H}_{P\theta}^l \Delta \bar{z}_p(V^k, \theta^k) \quad (3.61)$$

$$\bar{\theta}^k \leftarrow \bar{\theta}^k + \Delta \bar{\theta}^k \quad (3.62)$$

(b) Realizar iteração QV :

$$\Delta \bar{V}^k = \bar{H}_{QV}^I \Delta \bar{z}_q(V^k, \theta^k) \quad (3.63)$$

$$\bar{V}^k \leftarrow \bar{V}^k + \Delta \bar{V}^k \quad (3.64)$$

O algoritmo dual é:

Repetir até que a convergência seja atendida, com as tolerâncias atendidas:

(a) Realizar iteração QV :

$$\Delta \bar{V}^k = \bar{H}_{QV}^I \Delta \bar{z}_q(V^k, \theta^k) \quad (3.65)$$

$$\bar{V}^k \leftarrow \bar{V}^k + \Delta \bar{V}^k \quad (3.66)$$

(b) Realizar iteração $P\theta$:

$$\Delta \bar{\theta}^k = \bar{H}_{P\theta}^I \Delta \bar{z}_p(V^k, \theta^k) \quad (3.67)$$

$$\bar{\theta}^k \leftarrow \bar{\theta}^k + \Delta \bar{\theta}^k \quad (3.68)$$

onde $\bar{H}_{P\theta}^I$ é a aproximação de $\bar{H}_{P\theta}^I$, utilizando $-1/x$ ao invés de b .

Os testes realizados em (MONTICELLI; GARCIA, 1990) mostram que o método desacoplado no algoritmo é mais robusto que a versão padrão, apresentando melhor convergência para sistemas com uma relação X/R baixa.

4. SIMULADOR DE MEDIDAS E ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Conforme abordado em (ARRILLAGA; HARKER, 1978), efeitos de desbalanceamento podem ser observados tanto em sistemas de transmissão quanto de distribuição. Na transmissão, com uma menor discrepância, é vista nos dados de rede, devido a transposições de linha e por múltiplas linhas compartilhando um mesmo espaço físico. No nível de distribuição os desbalanceamentos ocorrem principalmente nas potências das cargas, devido aos efeitos desiguais de cargas monofásicas. Desta maneira verifica-se que um estudo de estimação de estado trifásico mais completo poderia abordar sistemas de transmissão, de forma que permita avaliar o impacto nos desbalanceamentos dos parâmetros da rede; e sistemas de distribuição, onde os efeitos mais severos do desbalanço causado pelas cargas precisam ser avaliados e sua influência no estado do sistema reportada aos operadores.

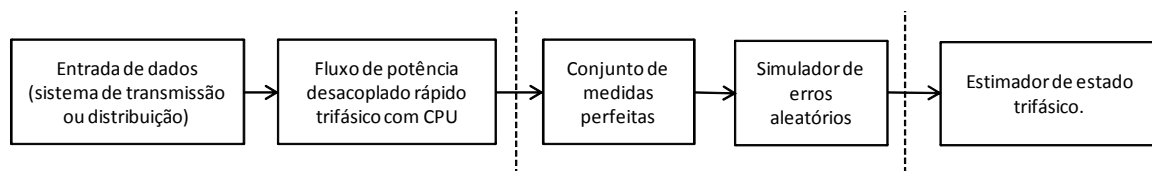
Um fator relevante nos estudos de estimação de estados é a necessidade de disponibilidade de um conjunto de medidas capaz de traduzir o comportamento de um sistema qualquer. Quando a abordagem envolve a representação trifásica do sistema e ainda o interesse em sistemas de transmissão e distribuição, que possuem características bem distintas, o desafio é ainda maior. Sendo assim, conforme discutido no Capítulo 1, esse trabalho propõe duas frentes de desenvolvimento. A primeira diz respeito ao simulador de medidas trifásico, capaz de processar redes de transmissão e distribuição trifásicas, considerando suas diferentes características e necessidades. A segunda apresenta uma abordagem trifásica da formulação do estimador de estados propriamente dito.

Com relação ao simulador de medidas, estudos recentes relativos à normalização complexa e fluxo de potência trifásico (DURCE; TORTELLI; LOURENÇO; LODDI, 2012), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015) são amplamente explorados. Já para os estudos relacionados à estimação de estados trifásica, os métodos de estimação de estado desacoplada, propostos na literatura com uma abordagem monofásica (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004), são estudados e estendidos.

Nesse capítulo são apresentados os desenvolvimentos referentes às duas ferramentas propostas: simulador de medidas trifásico e estimador de estados trifásico desacoplado.

Na FIGURA 2 encontra-se o fluxograma que descreve o encadeamento das duas ferramentas propostas. A entrada de dados representa os dados do sistema a ser simulado, com todos seus dados de linha e de barras. Este passa por um fluxo de potência trifásico desacoplado rápido com normalização complexa, que permite que o sistema de entrada seja de transmissão ou distribuição. Os resultados deste fluxo são recebidos pelo simulador de medidas, que agrupa o conjunto de medidas perfeitas e adiciona os erros aleatórios, que para este trabalho ficaram limitados aos ruídos normais. Por fim, o resultado deste simulador será observado por um ensaio de estimador de estado trifásico desacoplado, que representa os primeiros esforços do grupo nesse tema.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA SIMULADOR DE MEDIDAS E ENSAIOS DE ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICO



Fonte: O autor (2017)

4.2 SIMULADOR DE MEDIDAS

O estimador de estado trifásico tem despertado interesse de diversos grupos de pesquisa e mesmo da indústria em todo mundo (LI; SUN; WANG; ZHANG; WU, 2011) e (GÖL; ABUR, 2014). Estes novos desenvolvimentos precisam de dados confiáveis e verossímeis para serem testados. Para tal necessidade este trabalho propõe um simulador de medidas trifásico que atenda tanto às necessidades do estimador de estados trifásico voltado para sistemas de distribuição como para eventuais abordagens trifásicas voltadas para sistemas de transmissão. Tal gerador está fundamentado em

um fluxo de carga trifásico aprimorado, com alto desempenho computacional e capaz de lidar facilmente com o desbalanceamento da carga, com a forte presença de geração distribuída e com operações malhadas (em anel), atendendo assim os requisitos necessários para novos estudos de EE em SDs. Além disso, a metodologia proposta permite o aproveitamento de novas fontes de informação disponibilizadas pelos sistemas avançados de medição (do inglês *Advanced Measurement System - AMS*).

A metodologia proposta do gerador de medidas contém duas etapas principais. A primeira, alia o alto desempenho do fluxo de potência trifásico desacoplado rápido (FP3F-DR) às técnicas de normalização complexa por unidade (do inglês, *complex per unit normalization - cpu*), recentemente apresentado na literatura (PORTELINHA; TORTELLI, 2015), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015). Como resultado desta primeira etapa tem-se uma ferramenta capaz de processar e gerar, a partir de um plano de medição previamente definido, um conjunto de medidas perfeitas para sistemas de transmissão ou sistemas de distribuição emergentes de grandes dimensões. A segunda etapa contempla a incorporação de erros aleatórios ao conjunto de medidas perfeitas, simulando as imperfeições intrínsecas do processo de medição. Esses erros seguem a metodologia proposta em (FREUND, 2006) e aprimorada em (ALBERTINI, 2010). Como resultado final obtém-se um simulador de medidas para redes de distribuição trifásicas, capaz de fornecer dados coerentes para estudos de estimação de estados em sistemas de distribuição emergentes.

O simulador de medidas proposto disponibiliza fluxos de potência ativa e reativa nos dois sentidos, injeções de potência ativa e reativa em todas as barras, medidas de magnitude das tensões em todas as barras e medidas de ângulo das tensões em todas as barras (prevendo a possibilidade de medidas sincrofasoriais). Desta forma, a partir de uma definição preliminar, pode-se obter o conjunto desejado de medidas a ser processado pelo estimador de estados, atendendo ao interesse específico de cada estudo.

4.2.1 Fluxo de Potência Trifásico

O fluxo de potência trifásico que compõe o simulador de medidas proposto neste trabalho alia as técnicas de normalização complexa à formulação desacoplada trifásica, conforme proposto em (PORTELINHA; TORTELLI, 2015), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015). Sendo assim, as próximas seções apresentam a fundamentação teórica dessa ferramenta.

A normalização por unidade é um procedimento padrão em estudos do sistema de potência. Neste as diferentes medidas do sistema elétrico são normalizadas a partir de suas respectivas bases de tensão local em cada área e pela base de potência única em volt-ampères. Na normalização por unidade tradicional, tanto as bases de tensão quanto a base de potência são valores reais.

Estudos recentes propõem o uso de uma base de potência complexa e a possibilidade de bases de potência distintas para diferentes alimentadores, que deram origem a normalização complexa por unidade (cpu) (DURCE; TORTELLI; LOURENÇO; LODDI, 2012), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015). Enquanto a base de potência pertence ao conjunto dos números complexos, possuindo magnitude (S_{base}) e defasagem angular (φ_{base}), as bases de tensão (V_{base}) são mantidas dentro do conjunto de números reais.

Em outras palavras, tem-se (DURCE; TORTELLI; LOURENÇO; LODDI, 2012), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015):

$$\dot{S}_{base} = |\dot{S}_{base}| \cdot e^{-j\varphi_{base}} \quad (4.1)$$

Como consequência, as bases de impedância também se tornam complexas, possuindo a mesma defasagem angular que a potência base, ou seja, (DURCE; TORTELLI; LOURENÇO; LODDI, 2012), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015):

$$\dot{Z}_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot e^{j(\theta + \varphi_{base})} \quad (4.2)$$

Na qual R_Ω , X_Ω e Z_Ω são, respectivamente, a resistência, reatância e impedância em ohms, \dot{Z}_{pu} é a impedância na normalização convencional (pu) e θ é o ângulo original da impedância.

De (4.2) obtém-se a resistência e reatância em cpu:

$$R_{cpu} = |\dot{Z}_{cpu}| \cdot \cos(\theta + \varphi_{base}) \quad (4.3)$$

$$X_{cpu} = |\dot{Z}_{cpu}| \cdot \sin(\theta + \varphi_{base}). \quad (4.4)$$

De forma que

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \varphi_{base}) \quad (4.5)$$

Pela relação apresentada em (4.5), observa-se que com a aplicação da normalização complexa a relação X/R das linhas do sistema passa a ser função do ângulo base φ_{base} adotado para a potência base.

A normalização complexa também tem impacto nas potências injetadas nas barras do sistema e as correntes nos ramos. O valor normalizado das injeções de potência complexa (\dot{S}_{cpu}) e suas parcelas real (P_{cpu}) e imaginária (Q_{cpu}) passam a ser determinadas da seguinte forma (DURCE; TORTELLI; LOURENÇO; LODDI, 2012), (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015):

$$P_{cpu} = |\dot{S}_{cpu}| \cdot \cos(\delta + \varphi_{base}) \quad (4.6)$$

$$Q_{cpu} = |\dot{S}_{cpu}| \cdot \sin(\delta + \varphi_{base}) \quad (4.7)$$

Nas quais δ é o ângulo original da injeção de potência complexa.

Conforme demonstrado em (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015), a aplicação da normalização complexa não afeta os valores das tensões nodais, que se mantêm inalteradas tanto em magnitude quando em fase quando comparado à normalização convencional. Além disso, a equação (4.5) demonstra que a relação X/R pode ser ajustada a partir da escolha adequada do ângulo de base, permitindo a utilização do método desacoplado-rápido para solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição, (TORTELLI; LOURENÇO; GARCIA, 2015), atendo assim a necessidade de alto desempenho e as dificuldades de tratamento de redes não radiais e com alta penetração de geração distribuída (GD).

No fluxo de potência trifásico é necessário representar as tensões nodais complexas e injeções de potência complexas para cada uma das fases nas barras,

assim como as impedâncias próprias e mútuas dos ramos trifásicos do sistema. Assim, para cada barra i do sistema tem-se (ARRILLAGA; HARKER, 1978):

$$V_i = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix}; \theta_i = \begin{bmatrix} \theta_i^a \\ \theta_i^b \\ \theta_i^c \end{bmatrix}; P_i = \begin{bmatrix} P_i^a \\ P_i^b \\ P_i^c \end{bmatrix}; Q_i = \begin{bmatrix} Q_i^a \\ Q_i^b \\ Q_i^c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Na qual V_i^p e θ_i^p são o módulo da tensão e sua defasagem angular na barra i fase p ($p \in \{a, b, c\}$), respectivamente; P_i^p e Q_i^p são as injeções de potência ativa e reativa na barra i fase p , respectivamente.

E para cada ramo $i - k$, considerando o modelo π da linha, temos as impedâncias série (Z_{ik}) e admitâncias shunt ($Y_{ik,shunt}$) dadas por (ARRILLAGA; HARKER, 1978):

$$Z_{ik} = \begin{bmatrix} Z_{ik}^{aa} & Z_{ik}^{ab} & Z_{ik}^{ac} \\ Z_{ik}^{ba} & Z_{ik}^{bb} & Z_{ik}^{bc} \\ Z_{ik}^{ca} & Z_{ik}^{cb} & Z_{ik}^{cc} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$Y_{ik,shunt} = \begin{bmatrix} Y_{ik,shunt}^{aa} & Y_{ik,shunt}^{ab} & Y_{ik,shunt}^{ac} \\ Y_{ik,shunt}^{ba} & Y_{ik,shunt}^{bb} & Y_{ik,shunt}^{bc} \\ Y_{ik,shunt}^{ca} & Y_{ik,shunt}^{cb} & Y_{ik,shunt}^{cc} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

No caso do fluxo de potência trifásico, os desvios de potência ativa e reativa são especificados por fase e dados por:

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)^{sp} - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}) \quad (4.11)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)^{sp} - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}) \quad (4.12)$$

onde:

n - o número de barras do sistema;

ΔP_i^p - desvio de potência ativa da fase p da barra i ;

ΔQ_i^p - desvio de potência reativa da fase p da barra i ;

$(P_i^p)^{sp}$ - potência ativa especificada da fase p da barra i ;

$(Q_i^p)^{sp}$ - potência reativa especificada da fase p da barra i ;

V_i^p - módulo da tensão da fase p da barra i ;

θ_{ik}^{pm} é a diferença angular entre as fases p e m das barras i e k , respectivamente;

G_{ik}^{pm}, B_{ik}^{pm} são os coeficientes reais e imaginários, respectivamente, da matriz de admitâncias referentes às fases p e m entre as barras i e k .

O FP3-DR está baseado nas mesmas considerações propostas na literatura consolidada dos métodos desacoplados: (i) são desconsiderados os efeitos causados pela variação dos ângulos das tensões ($\Delta\theta$) no fluxo de potência reativo e os efeitos causados pela variação dos módulos das tensões (ΔV) no fluxo de potência ativo, e; (ii) a matriz Jacobiana associada ao problema sofre alterações para ser mantida constante ao longo do processo iterativo.

A consideração (i) permite o desacoplamento entre os subproblemas ativo (envolvendo as relações $P\theta$) e reativo (envolvendo as relações QV) do fluxo de potência. Estes subproblemas são solucionados separadamente e de forma sequencial, permitindo escrever, já normalizando os desvios de potência pelos módulos das tensões:

$$\frac{\Delta P}{|V|} = B' \cdot \Delta\theta \quad (4.13)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V|} = B'' \cdot \Delta V \quad (4.14)$$

Nas quais B' e B'' são as matrizes constantes graças às linearizações e simplificações propostas na formulação básica do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido (STOTT; ALSAÇ, 1973), atendendo assim a consideração (ii). Para o caso trifásico estas matrizes são dadas por:

$$B'_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (4.15)$$

$$B''_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (4.16)$$

Esta última simplificação considera que $\theta_{ik}^{pm} = \pm 120^\circ$ para $m \neq p$ e $\theta_{ik}^{pp} = 0^\circ$, contudo esta simplificação ocorre somente no início do processo iterativo, quando as jacobianas são calculadas, e não deve ser confundida com a defasagem angular real

das linhas. Por se tratar do método desacoplado rápido, estas matrizes não são recalculadas a cada iteração.

Os sistemas lineares descritos em (4.13) e (4.14) são resolvidos iterativamente, atualizando os vetores de tensão e ângulo até que a tolerância desejada seja obtida. Assim, o FP3-DR fornece como resultados as tensões complexas nodais em cada fase da rede, a partir das quais são determinados fluxos de potência trifásicos, as injeções de potência e as perdas trifásicas da rede.

4.2.2 Simulador de Medidas Trifásico

O modelo de medição adotado em estudos de estimação de estados prevê a representação do vetor de medidas, \mathbf{Z} , de dimensão $(m \times 1)$ para o caso monofásico, onde m é o número de medidas disponíveis na rede. De acordo com esse modelo, o vetor de medidas pode ser escrito em função de seus valores verdadeiros, \mathbf{Z}_o , e dos erros de medição $\boldsymbol{\eta}$, de forma que:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_o + \boldsymbol{\eta} \quad (4.17)$$

Considera-se que $\boldsymbol{\eta}$ é um vetor com distribuição normal e matriz de covariância diagonal (MONTICELLI, 1999). Os medidores que possuem maior grau de precisão têm desvio padrão (σ) e variâncias (σ^2) menores, apresentando desvios de medida (η) menores.

No caso do estimador de estados trifásico, o conjunto de medidas contém os valores por fase das grandezas medidas, podendo conter fluxos de potência ativa e/ou reativa em cada fase de um determinado ramo trifásico, as injeções de potência ativa e/ou reativa em cada fase da barra medida. Fazem parte também do conjunto de medidas tradicionais as magnitudes de cada uma das três fases da tensão na barra, além do módulo das correntes em cada fase de cada ramo monitorado. Diversas outras medidas advindas de unidades de medição fasorial, PMUs (do inglês, *Phasor Measurement Unit*) e de dispositivos eletrônicos inteligentes, IEDs (do inglês, *Intelligent Electronic Devices*) podem também compor o conjunto de informações processadas pelo estimador de estados. Nesse trabalho essas informações são contempladas,

incluindo-se as magnitudes e ângulos das tensões e correntes em cada fase monitorada por esses equipamentos de medição.

Assim, para o caso trifásico, propõe-se que as medidas sejam representadas por uma matriz Z de dimensão $(3m \times 1)$, sendo que cada coluna apresenta os valores medidos em cada fase (a,b e c), de forma que:

$$Z = \begin{bmatrix} [t_{km}^a & t_{km}^b & t_{km}^c]^T \\ [t_{mk}^a & t_{mk}^b & t_{mk}^c]^T \\ [u_{km}^a & u_{km}^b & u_{km}^c]^T \\ [u_{mk}^a & u_{mk}^b & u_{mk}^c]^T \\ [P_k^a & P_k^b & P_k^c]^T \\ [Q_k^a & Q_k^b & Q_k^c]^T \\ [V_k^a & V_k^b & V_k^c]^T \\ [\theta_k^a & \theta_k^b & \theta_k^c]^T \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

onde:

$t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c$ – medidas do fluxo de potência ativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$t_{mk}^a, t_{mk}^b, t_{mk}^c$ – medidas do fluxo de potência ativa para o ramo $m - k$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c$ – medidas do fluxo de potência reativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente;

$u_{mk}^a, u_{mk}^b, u_{mk}^c$ – medidas do fluxo de potência reativa para o ramo $k - m$ nas fases a, b e c , respectivamente

P_k^a, P_k^b, P_k^c – medidas de injeção de potência ativa para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c – medidas de injeção de potência reativa para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

V_k^a, V_k^b, V_k^c – medidas de módulo de tensão para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

$\theta_k^a, \theta_k^b, \theta_k^c$ – medidas tensão para a barra k fases a, b e c , respectivamente;

O simulador de medidas trifásico aqui proposto pode ser dividido em duas etapas: Na primeira etapa são gerados os valores verdadeiros das grandezas trifásicas, agrupados em uma matriz, Z_o , de dimensão $(3m \times 1)$, similar a matriz Z definida em (4.18) A segunda etapa inclui os erros de medição, η , que na abordagem trifásica passa também a ser representado por uma matriz trifásica $(3m \times 1)$. As duas etapas são detalhadas nas próximas seções.

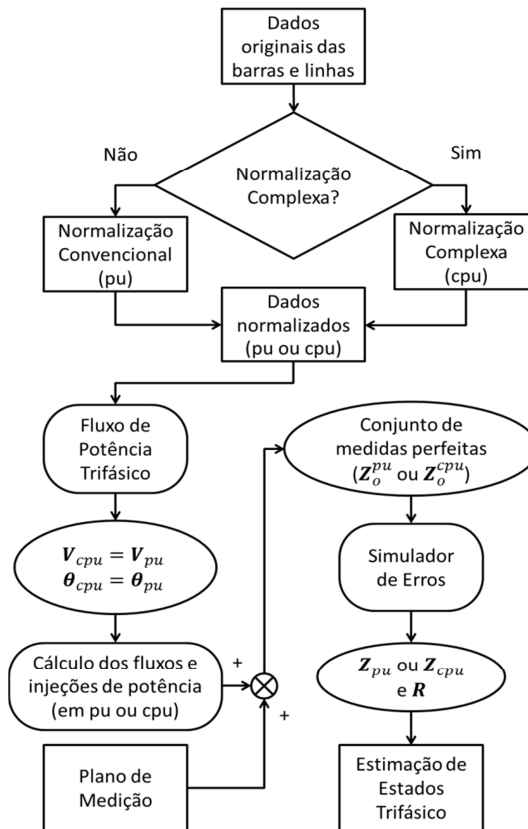
4.2.3 Gerador de Medidas Verdadeiras: 1ª Etapa

Considerando que as metodologias tradicionais de fluxo de potência não podem ser diretamente aplicadas aos sistemas de distribuição emergentes (topologias não necessariamente radiais, GDs, etc), este trabalho propõe o FP3-DR aliado às técnicas de normalização complexa, para, a partir de um plano de medição pré-definido, determinar a matriz de medidas verdadeiras (Z_o).

O Fluxograma apresentado na FIGURA 2 demonstra o procedimento adotado na determinação da matriz Z_o . De acordo com o algoritmo proposto, o operador pode escolher a normalização convencional ou a normalização complexa dos dados do sistema. Em caso de sistemas de distribuição, a normalização complexa deve ser adotada, de forma que os dados normalizados passam a apresentar relações X/R elevadas (em níveis similares aos da transmissão), possibilitando assim a aplicação do FP3-DR para esses sistemas. Enquanto a cpu torna possível a aplicação do FP3-DR, este, por sua vez, permite o processamento de redes de distribuição emergentes que podem conter topologia malhada, forte inserção de GDs, e todas as demais características desses sistemas. Ao mesmo tempo, apresenta desempenho compatível com as grandes dimensões desses sistemas, uma vez que adota a formulação desacoplada rápida. No caso de aplicações para sistemas de transmissão, um ângulo de base nulo passa a ser adotado para a normalização complexa, tornando-se equivalente à normalização p.u. convencional, de forma que a relação X/R que já possui níveis adequados nesses sistemas, mantém-se inalterada.

Assim, é possível, a partir de um plano de medição pré-definido e dos resultados do FP3-DR, determinar a matriz de medidas trifásicas verdadeiras (Z_o), como mostra o fluxograma da FIGURA 3.

FIGURA 3 – SIMULADOR DE MEDIDAS TRIFÁSICO



Fonte: O autor (2017)

4.2.4 Etapa 2: Simulador de Erros de Medição

A segunda etapa do gerador de medidas tem por objetivo incorporar erros aleatórios que emulam os erros intrínsecos ao processo de medição, provenientes da precisão dos equipamentos de medição. Esses erros são somados ao conjunto de medidas verdadeiras, reproduzindo assim o modelo de medição descrito em (4.18). O fluxograma da FIGURA 3 ilustra também essa etapa do algoritmo proposto. A metodologia adotada para geração desses erros é discutida e apresentada na sequência.

Os erros de medição podem ser classificados nos seguintes grupos, nos quais σ representa o desvio padrão (ALBERTINI, 2010):

Erro extremo: $|Z - Z_o| > 20\sigma$

Erro grosseiro: $3\sigma < |Z - Z_o| < 20\sigma$

Ruído normal: $|Z - Z_o| < 3\sigma$

Os erros extremos são filtrados antes do processo de estimação de estados propriamente dito, enquanto que os erros grosseiros são alvo de um processamento mais elaborado que conta com a redundância do plano de medição e da capacidade intrínseca dos estimadores de detectar e identificar esses erros. Assim, os erros aleatórios a serem inseridos pelo simulador de medidas proposto compreendem aos erros de menor magnitude, definidos no terceiro grupo: ruído normal. Este ruído é causado pelas imperfeições nos instrumentos de medição, desde os transformadores de corrente (TC), de potencial (TP), precisão dos medidores ou mesmo da apresentação do sistema SCADA.

Na literatura, existem diversos métodos para a inclusão de ruídos nas medidas exatas, dentre alguns destes temos o método proposto em (ABUR; ÇELIC, 1990), que utiliza valores fixos para a variância conforme o tipo de medida. Já (ALLAM; LAUGHTON, 1974) e (LUI; WU, 1992) adotam diferentes variâncias em função da magnitude do valor medido. Também é possível definir o valor das variâncias em função do fundo de escala dos equipamentos de medição, como em (IRVING; OWEN, 1978).

O simulador de erros proposto neste trabalho se baseia no método apresentado por (FREUND, 2006) que simulou os ruídos para cada medida, considerando estes independentes. Assim, a cada medida Z_o simulada adiciona-se um ruído definido pelas características desejadas dos medidores (3σ) e um número aleatório com distribuição normal (α). Para cada medida assume-se que os erros aleatórios atribuídos têm média zero e desvio padrão determinado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} Z = |Z_o| + (3\sigma_Z) \cdot \alpha \\ (3\sigma_Z) = pr \cdot fe \end{cases} \quad (4.19)$$

onde σ_Z - desvio padrão associado à medida; $|Z_o|$ - módulo do vetor verdadeiro da medida Z_o ; pr - precisão do medidor = 0,02; fe - fundo de escala do medidor; e, α - Variável Aleatória $N(0,1)$.

O valor de fundo de escala varia de acordo com a natureza da medida. Para magnitude de tensão foi utilizado $fe = 1,1$. Já o valor de fe para os demais tipos de medidas varia conforme a dimensão do sistema e magnitude das medidas verdadeiras (Z_o).

Os valores de fe adotados para medidas de fluxo e injeções de potência em sistemas de até 14 barras são os descritos em TABELA 2:

TABELA 2 – fe ATÉ 14 BARRAS

Magnitude de Z_o (pu)	fe das medidas de injeção e fluxo
$2,0 \leq Z_o \leq 2,5$	2,5
$1,0 \leq Z_o \leq 2,0$	2,0
$0,65 \leq Z_o \leq 1,0$	1,0
$0,35 \leq Z_o \leq 0,65$	0,65
$0,2 \leq Z_o \leq 0,35$	0,35
$0,1 \leq Z_o \leq 0,2$	0,2
$0,05 \leq Z_o \leq 0,1$	0,1
$0 \leq Z_o \leq 0,05$	0,05

Fonte: Albertini (2010).

E para sistemas com mais de 14 barras em TABELA 3:

TABELA 3 – fe ACIMA 14 BARRAS

Magnitude de Z_o (MW)	fe das medidas de injeção e fluxo
$2,0 \leq Z_o \leq 2,8$	2,8
$1,8 \leq Z_o \leq 2,0$	2,0
$1,0 \leq Z_o \leq 1,8$	1,8
$0,5 \leq Z_o \leq 1,0$	1,0
$0,2 \leq Z_o \leq 0,5$	0,5
$0,1 \leq Z_o \leq 0,2$	0,2
$0 \leq Z_o \leq 0,1$	0,1

Fonte: Albertini (2010).

O simulador de medidas eventualmente gera erros grosseiros, como ocorre em um sistema real. No entanto, o estudo do estimador de estado trifásico, não está prevendo um meio de detectar e manipular erros grosseiro, e por essa razão é necessário que para o simulador de medidas não processe erros grosseiros. Desta maneira, é necessário que o próprio simulador de medidas detecte a existência de um erro grosseiro, ao observar que a medida gerada está fora da característica de ruído normal, que conforme apresentado anteriormente, é dada matematicamente por $|Z - Z_o| < 3\sigma_z$. Ao identificar esta situação, a medida em questão é recalculada e avaliada, para que esteja apropriada para o uso no estudo do estimador de estado trifásico.

Esta condição de eliminação de erros grosseiros pode ser retirada, conforme a necessidade da utilização do simulador de medidas em um sistema que suporta e requer a geração de erros grosseiros.

4.3 ESTIMADOR DE ESTADO TRIFÁSICO PROPOSTO

Conforme descrito anteriormente este trabalho apresenta os primeiros esforços do grupo de pesquisa em que está inserido nos estudos de estimação de estados trifásico. O estimador de estado trifásico proposto está baseado no estimador de estados desacoplado rápido monofásico (ABUR; GOMEZ EXPÓSITO, 2004), descrito no Capítulo 3 deste trabalho. Será considerada a abordagem que adota aproximações tanto na matriz ganho quanto na matriz Jacobina.

Semelhante ao fluxo de potência, o desacoplamento na estimação de estados divide as equações de medidas em duas partes, conforme já apresentado em (4.18): Medidas potência ativa: injeção de potência ativa nas barras (p) e medidas de fluxo de potência ativa nos ramos (t). Medidas de potência reativa: medidas de injeção de potência reativa nas barras (q), medidas de fluxo de potência reativo nos ramos (u) e medidas de magnitude de tensão (V).

Para simplificar as análises deste trabalho, propõe-se que as impedâncias mútuas entre fases sejam desprezadas, permitindo, assim, o cálculo independente do processo de estimação para cada uma das fases.

Na formulação trifásica, a quantidade de estados do sistema passa a ser composta por seis estados por barra (HANSEN; DEBBS, 1995), sendo eles três magnitudes de tensão (V_a, V_b, V_c) e três ângulos de fase (θ_a, θ_b e θ_c)

Os vetores de medidas são agrupados por fase, conforme as medidas utilizadas pelo estudo do estimador de estado. Nessa primeira abordagem, considera-se apenas medidas de fluxo em um extremo do ramo (k-m), de forma que:

$$Z^a = \begin{bmatrix} t_{km}^a \\ u_{km}^a \\ P_k^a \\ Q_k^a \\ V_k^a \end{bmatrix} \quad Z^b = \begin{bmatrix} t_{km}^b \\ u_{km}^b \\ P_k^b \\ Q_k^b \\ V_k^b \end{bmatrix} \quad Z^c = \begin{bmatrix} t_{km}^c \\ u_{km}^c \\ P_k^c \\ Q_k^c \\ V_k^c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

As matrizes de covariância e Jacobiana assumem também composição trifásica podendo ser genericamente representadas por:

$$R^a = \begin{bmatrix} R_P^a & 0 \\ 0 & R_Q^a \end{bmatrix}$$

$$R^b = \begin{bmatrix} R_P^b & 0 \\ 0 & R_Q^b \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$R^c = \begin{bmatrix} R_P^c & 0 \\ 0 & R_Q^c \end{bmatrix}$$

$$H^a(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^a & H_{PV}^a \\ H_{Q\theta}^a & H_{QV}^a \end{bmatrix}$$

$$H^b(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^b & H_{PV}^b \\ H_{Q\theta}^b & H_{QV}^b \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$H^c(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^c & H_{PV}^c \\ H_{Q\theta}^c & H_{QV}^c \end{bmatrix}$$

Para o cálculo do estimador de estado desacoplado rápido algumas premissas são consideradas. Algumas destas já consagradas pela literatura e vastamente trabalhada no modelo monofásico, sendo elas:

- partida plana ($V_i = 1 \text{ pu}$ para todas as barras e fases e $\theta_i^a = 0^\circ$, $\theta_i^b = 120^\circ$ e $\theta_i^c = -120^\circ$, para todas as barras);

- elementos diagonais da matriz Jacobiana H_{PV}^a , $H_{Q\theta}^a$, H_{PV}^b , $H_{Q\theta}^b$, H_{PV}^c e $H_{Q\theta}^c$ ignorados para todas as fases, utilizando apenas os da diagonal principal $H_{P\theta}^a$, H_{QV}^a , $H_{P\theta}^b$, H_{QV}^b , $H_{P\theta}^c$ e H_{QV}^c .

Calcula-se os elementos da matriz ganho G, considerando os dois passos anteriores, eliminando os blocos de fora da diagonal, tornando-a desacoplada:

$$\begin{aligned} G^a &= \begin{bmatrix} G_{P\theta}^a & 0 \\ 0 & G_{QV}^a \end{bmatrix} \\ G^b &= \begin{bmatrix} G_{P\theta}^b & 0 \\ 0 & G_{QV}^b \end{bmatrix} \\ G^c &= \begin{bmatrix} G_{P\theta}^c & 0 \\ 0 & G_{QV}^c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.23)$$

De forma que:

$$\begin{aligned} G_{P\theta}^a &= H_{P\theta}^{t\ a} R_P^{-1\ a} H_{P\theta}^a \text{ e } G_{QV}^a = H_{QV}^{t\ a} R_Q^{-1\ a} H_{QV}^a \\ G_{P\theta}^b &= H_{P\theta}^{t\ b} R_P^{-1\ b} H_{P\theta}^b \text{ e } G_{QV}^b = H_{QV}^{t\ b} R_Q^{-1\ b} H_{QV}^b \\ G_{P\theta}^c &= H_{P\theta}^{t\ c} R_P^{-1\ c} H_{P\theta}^c \text{ e } G_{QV}^c = H_{QV}^{t\ c} R_Q^{-1\ c} H_{QV}^c \end{aligned} \quad (4.24)$$

As mesmas aproximações da Jacobiana H podem ser consideradas para o lado direito da equação $\bar{G}_{P\theta} \Delta \bar{\theta} = \bar{T}_{P\theta}$, utilizada no método desacoplado monofásico. Desta forma:

$$\begin{aligned} T^a &= \begin{bmatrix} H_{P\theta}^{T\ a} R_P^{-1\ a} \Delta z_P'^a \\ H_{QV}^{T\ a} R_Q^{-1\ a} \Delta z_Q'^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P^a \\ T_Q^a \end{bmatrix} \\ T^b &= \begin{bmatrix} H_{P\theta}^{T\ b} R_P^{-1\ b} \Delta z_P'^b \\ H_{QV}^{T\ b} R_Q^{-1\ b} \Delta z_Q'^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P^b \\ T_Q^b \end{bmatrix} \\ T^c &= \begin{bmatrix} H_{P\theta}^{T\ c} R_P^{-1\ c} \Delta z_P'^c \\ H_{QV}^{T\ c} R_Q^{-1\ c} \Delta z_Q'^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P^c \\ T_Q^c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.25)$$

onde:

$$\begin{aligned}\Delta z_P'^a &= \frac{\Delta z_P^a}{V^a} \\ \Delta z_P'^b &= \frac{\Delta z_P^b}{V^b} \\ \Delta z_P'^c &= \frac{\Delta z_P^c}{V^c};\end{aligned}\tag{4.126}$$

$$\begin{aligned}\Delta z_Q'^a &= \frac{\Delta z_Q^a}{V^a} \\ \Delta z_Q'^b &= \frac{\Delta z_Q^b}{V^b} \\ \Delta z_Q'^c &= \frac{\Delta z_Q^c}{V^c};\end{aligned}\tag{4.272}$$

$$\begin{aligned}\Delta z_P^a &= z_P^a - h_P^a(\hat{x}) \\ \Delta z_P^b &= z_P^b - h_P^b(\hat{x}) \\ \Delta z_P^c &= z_P^c - h_P^c(\hat{x});\end{aligned}\tag{4.28}$$

$$\begin{aligned}\Delta z_Q^a &= z_Q^a - h_Q^a(\hat{x}) \\ \Delta z_Q^b &= z_Q^b - h_Q^b(\hat{x}) \\ \Delta z_Q^c &= z_Q^c - h_Q^c(\hat{x}).\end{aligned}\tag{4.29}$$

Considerando então:

$$\Delta \theta^a = G_{P\theta}^{-1a} * T_P^a$$

$$\Delta V^a = G_{QV}^{-1a} * T_Q^a$$

$$\Delta \theta^b = G_{P\theta}^{-1b} * T_P^b$$

$$\Delta V^b = G_{QV}^{-1b} * T_Q^b$$

$$\Delta \theta^c = G_{P\theta}^{-1c} * T_P^c$$

$$\Delta V^c = G_{QV}^{-1c} * T_Q^c$$

Podemos considerar o critério de convergência do processo iterativo atingido quando, para cada fase independente uma da outra, $\max|\Delta\theta^a| < \varepsilon$, $\max|\Delta V^a| < \varepsilon$, $\max|\Delta\theta^b| < \varepsilon$, $\max|\Delta V^b| < \varepsilon$, $\max|\Delta\theta^c| < \varepsilon$ e $\max|\Delta V^c| < \varepsilon$.

Utiliza-se o seguinte algoritmo para o estimador de estados trifásico desacoplado rápido, em que o índice f representa as fases a, b e c:

- (a) Inicializar todas as tensões de barra em partida planta, com $\bar{V}^f = 1$ e $\bar{\theta}^f = 0$.
- (b) Construir e decompor as matrizes $\bar{G}_{P\theta}^f$ e \bar{G}_{QV}^f com (4.24).
- (c) Calcular $T_{P\theta}^f$ com (4.25).
- (d) Resolver $\bar{G}_{P\theta}^f \Delta\bar{\theta}^f = \bar{T}_{P\theta}^f$.
- (e) Checar se ambos $\Delta\bar{V}^f$ e $\Delta\bar{\theta}^f$ são menores que a tolerância de convergência.
Se sim, pare. Se não, continuar.
- (f) Atualiza $\bar{\theta}^{k+1f} = \bar{\theta}^{kf} + \Delta\bar{\theta}^f$.
- (g) Calcular T_{QV}^f com (4.25).
- (h) Resolver $\bar{G}_{QV}^f \Delta\bar{V}^f = \bar{T}_{QV}^f$.
- (i) Checar se ambos $\Delta\bar{V}^f$ e $\Delta\bar{\theta}^f$ são menores que a tolerância de convergência.
Se sim, pare. Se não, continuar.
- (j) Atualiza $\bar{V}^{k+1f} = \bar{V}^{kf} + \Delta\bar{V}^f$.

O algoritmo acima envolve para cada iteração k os cálculos do vetor de função das medidas $\bar{h}(\bar{x})$ e a construção da jacobiana $\bar{H}(\bar{x})$.

O mesmo algoritmo é executado para as fases f a, b e c. A solução do problema foi realizada de forma sequencial, ou seja, o processamento da fase a, depois b e então a fase c. Porém, essa modelagem permite a aplicação de algoritmos computacionais de paralelismo, permitindo a execução das 3 fases simultaneamente.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Em um sistema real, a falta de medidas disponíveis, os ruídos normais e erros grosseiros são situações reais das quais um estimador de estado deve trabalhar. No

entanto, ao simular tal sistema, a dificuldade de gerar medidas coerentes com as disponíveis é um dos primeiros empecilhos. Desta maneira, para que seja possível um estudo de estimador de estado verossímil é necessário a criação de um simulador de medidas confiável.

Neste cenário, o simulador de medidas mostra-se de grande importância não apenas para incluir erros satisfatórios, sejam eles ruídos normais ou erros grosseiros, quanto também para obter um conjunto de medidas redundantes que possibilitem a observabilidade do sistema, e desta maneira viabilizar desenvolvimentos relacionados à estimação de estado do sistema.

O simulador de medidas apresentado atende tais necessidade, sendo adaptado para o estudo do estimador de estado proposto. Esta flexibilidade do programa mostra que sua utilização não fica restrita a este trabalho.

O simulador de medidas disponibiliza todas as medidas do sistema. Conforme apresentado em (4.22) são disponibilizadas todas as medidas possíveis em todas as barras e linhas para o ensaio do estimador de estado. No entanto, é fácil criar um ajuste que permita uma seleção de quais medidas serão disponibilizadas pelo simulador.

O estimador de estado trifásico proposto utiliza as medidas geradas pelo simulador e possibilita estimar as tensões complexas trifásicas, V^a , V^b , V^c , θ^a , θ^b e θ^c , em todas as barras do sistema. Este trabalho permite uma análise inicial da utilização de um estimador de estados trifásico, trazendo suas vantagens para sistemas com desbalanceamento, tanto no sistema de transmissão como de distribuição. Apesar do estimador ainda não contemplar o uso de cpu, fornece as primeiras análises para sua incorporação, já prevista em trabalhos futuros do grupo de pesquisa. Cabe ressaltar que no caso do simulador de medidas, este já incorpora a utilização de cpu no fluxo de potência utilizado e, portanto, é indicado para aplicações em sistemas de transmissão e distribuição.

5. RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de simulações e testes realizados em diferentes sistemas elétricos, com o objetivo de demonstrar o desempenho das duas ferramentas propostas: simulador de medidas trifásico e estimador de estados trifásico, apresentados no capítulo anterior. A implementação das ferramentas foi feita no *software* MATLAB®.

A análise dos resultados se inicia com o gerador de medidas trifásico. Nesse caso, um fluxo de potência trifásico é aplicado à uma rede trifásica, utilizando diferentes sistemas como dados de entrada, que serão detalhados individualmente conforme sua utilização. Conforme apresentados no fluxograma apresentado na FIGURA 2, os resultados do fluxo de carga trifásico da rede são um conjunto de medidas perfeitas, fazendo-se necessário o uso do simulador de medidas que adicionará as imperfeições intrínsecas do processo de medição.

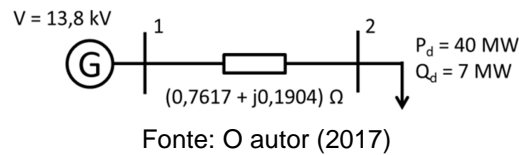
5.2 TESTE SIMULADOR DE MEDIDAS

O simulador de medida representa uma grande contribuição, devido sua eficiência em diferentes utilizações, e não apenas para o estimador trifásico proposto nesse trabalho. A próxima seção apresenta testes e resultados referentes a este, verificando sua eficiência.

5.2.1 Sistema ilustrativo de duas barras

O sistema representado pela FIGURA 4 foi utilizado para ilustrar o algoritmo proposto, sendo escolhidos potência base de 100 MW e tensão base 13,8 kV para a normalização convencional. Na FIGURA 4 – FASE A DO SISTEMA ILUSTRATIVO DE DUAS BARRAS estão representados os dados do sistema para a fase a. As injeções de potência nas fases b e c são iguais a 80% e 130% da injeção da fase a, respectivamente.

FIGURA 4 – FASE A DO SISTEMA ILUSTRATIVO DE DUAS BARRAS



O sistema apresenta medidas de injeção de potência ativa e reativa em ambas as barras, medida de fluxo de potência ativo e reativo no sentido 1-2 e medida PMU na barra de geração.

Devido à baixa relação X/R das linhas deste sistema ($X\Omega/R\Omega = 0,25$), o FP3-DR não encontra solução quando é utilizada a normalização convencional. Contudo, ao aplicar a normalização complexa com $\varphi = 70^\circ$, a relação X/R passa a ser $X_{pcu}/R_{cpu} = 9,57$. Como consequência desta relação mais adequada para a aplicação do FP3-DR, a solução é alcançada após 7 iterações no subproblema ativo e 10 iterações no subproblema reativo, quando considerada tolerância de 10^{-4} .

Assim, após a aplicação do simulador de medidas apresentado na FIGURA 3, são encontradas as medidas perfeitas (Z_o) e os valores medidos (Z) apresentados pela TABELA 4.

TABELA 4 – MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE DUAS BARRAS

	$Z_o(\text{pu})$			$Z(\text{pu})$			$3\sigma_z - Z - Z_o $		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
P_{12}	0,506	0,380	0,760	0,513	0,404	0,715	0,006	0,003	0,003
Q_{12}	0,097	0,071	0,151	0,096	0,072	0,165	0,001	0,001	0,001
P_1	0,506	0,380	0,760	0,516	0,379	0,775	0,003	0,012	0,005
P_2	-0,400	-0,320	-0,520	-0,397	-0,319	-0,539	0,01	0,006	0,001
Q_1	0,097	0,071	0,151	0,099	0,074	0,154	0	0	0,001
Q_2	-0,070	-0,056	-0,091	-0,068	-0,057	-0,094	0	0,001	0
$ V _1$	1,000	1,000	1,000	0,983	0,983	0,983	0,005	0,005	0,005
θ_1	0,000	-2,094	2,094	0,000	-2,094	2,094	0	0	0

Fonte: o autor (2017).

Ao comparar os valores verdadeiros das grandezas medidas (Z_o), obtidos pelo fluxo de potência trifásico, com os valores medidos, (Z), que são a saída do simulador de medidas, tem-se que as diferenças encontradas são pequenas, representando

assim ruídos normais de medição e formando um conjunto de dados viável para ser utilizado na estimação de estados trifásica.

Para comprovar que as diferenças entre as medidas está dentro do que é considerado ruído normal, como é mostrado na seção 4.1.4 deste trabalho, a relação $|Z - Z_o| < 3\sigma_z$ deve ser respeitada, excluindo a chance do erro estar dentro da categoria erro grosseiro ou erro extremo, que não serão utilizados no estimador de estado trifásico proposto. Os valores apresentados na TABELA 4 permitem concluir que todas as medidas estão dentro da precisão desejada.

5.2.2 Sistema teste 12 barras – Sistema de distribuição com GD

Os dados do sistema de 12 barras são baseados no sistema radial apresentado por (EMINOGLU, 2009). Este sistema possui originalmente relação X/R de 0,41. Para reforçar a capacidade da ferramenta proposta no tratamento de sistema com baixa relação X/R, os valores das resistências foram triplicados, implicando em um valor médio de X/R de 0,12. Em relação às cargas, a fim de proporcionar desequilíbrio, apenas a fase a foi mantida com sua carga original, enquanto nas fases b e c aplicou-se 80% e 130% dos valores originais, respectivamente. Também foram incluídas GDs nas barras 6 e 12, além de linhas artificiais conectando as barras 1-6, 3-11, 5-8 e 10-12 com impedâncias iguais a $(3 + j0,5) \Omega$, simulando assim um sistema malhado e com presença de geração distribuída.

A convergência do fluxo de potência é apresentada na TABELA 5, considerando tolerância de 10^{-4} . A convergência foi alcançada tanto pela normalização convencional, quanto para a normalização complexa. Porém, observa-se que com a normalização complexa o esforço computacional foi menor, economizando significativamente na quantidade de iterações para alcançar a convergência. Isto mostra que o simulador de medidas pode também ser utilizado em sistemas de distribuição com a presença de GD. O estado do sistema é apresentado na TABELA 6.

Através do estado real é possível calcular os valores verdadeiros para as injeções e fluxos de potência de todo o sistema. Estes são então enviados ao simulador de erros que, a partir da indicação das grandezas medidas (no plano de medição), gera

a matriz de valores trifásicos medidos do sistema. Na TABELA 7 são apresentados os valores reais e simulados de algumas medidas do sistema de 12 barras. Os valores simulados apresentam erros pequenos, que são considerados como ruídos do sistema de medição, formando assim um conjunto de dados factível para a estimação de estados trifásica.

TABELA 5 – CONVERGÊNCIA DO SISTEMA DE 12 BARRAS EM PU E CPU

Ângulo base	X/R	Iterações P	Iterações Q
0° (<i>pu</i>)	0,12	18	23
80° (<i>cpu</i>)	43,6	4	3

Fonte: o autor (2017).

TABELA 6 – ESTADO REAL DO SISTEMA DE 12 BARRAS

Barra	θ (rad)			$ V $ (pu)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	0,000	-2,094	2,094	1,000	1,000	1,000
2	0,003	-2,092	2,099	0,995	0,996	0,993
3	0,006	-2,090	2,103	0,991	0,994	0,987
4	0,007	-2,089	2,104	0,990	0,992	0,986
5	0,005	-2,091	2,102	0,993	0,995	0,989
6	0,003	-2,093	2,098	0,996	0,997	0,994
7	0,004	-2,091	2,100	0,994	0,995	0,991
8	0,006	-2,090	2,103	0,991	0,993	0,988
9	0,008	-2,088	2,106	0,988	0,991	0,983
10	0,007	-2,090	2,105	0,989	0,992	0,984
11	0,007	-2,090	2,104	0,990	0,993	0,985
12	0,006	-2,090	2,104	0,990	0,993	0,985

Fonte: o autor (2017).

TABELA 7 – MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE 12 BARRAS

	Z_o (pu)			Z (pu)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
$P_{1,2}$	17,308	12,859	24,047	17,335	12,951	23,934
$P_{11,12}$	-0,979	-1,516	-0,174	-0,958	-1,517	-0,176
$Q_{1,2}$	15,313	11,318	21,314	15,255	11,323	21,350
$Q_{11,12}$	-0,892	-1,431	-0,082	-0,902	-1,431	-0,082
P_1	31,970	23,058	45,469	31,902	23,081	45,427
P_3	-4,000	-3,200	-5,200	-3,944	-3,263	-5,233
P_6	4,000	4,400	3,400	4,041	4,476	3,423

P_{10}	-3,500	-2,800	-4,550	-3,453	-2,792	-4,543
P_{12}	4,500	4,800	4,050	4,476	4,764	3,991
Q_1	28,568	20,437	40,783	28,558	20,423	40,860
Q_3	-3,000	-2,400	-3,900	-3,062	-2,389	-3,825
Q_6	4,500	4,800	4,050	4,438	4,753	4,013
Q_{10}	-3,000	-2,400	-3,900	-2,999	-2,409	-3,822
Q_{12}	4,500	4,800	4,050	4,502	4,763	4,049
$ V _1$	1,000	1,000	1,000	0,986	0,986	0,986
$ V _6$	0,996	0,997	0,994	0,982	0,983	0,980
$ V _{12}$	0,990	0,993	0,985	0,976	0,979	0,971
θ_1	0,000	-2,094	2,094	0,000	-2,094	2,094
θ_6	0,003	-2,093	2,098	0,003	-2,093	2,098
θ_{12}	0,006	-2,090	2,104	0,006	-2,090	2,104

Fonte: o autor (2017).

5.2.3 Sistema teste IEEE 30 barras – Sistema de transmissão

Os dados do sistema de transmissão de 30 barras do IEEE, apresentado em detalhes na seção 5.3.1, são utilizados como teste para o simulador de medidas. Por ser um sistema de transmissão, o uso do ângulo de base é 0 (normalização convencional) já que as relações X/R já são adequadas.

Devido ao grande número de medidas, seguem os valores de algumas medidas seguidas de suas medidas reais na TABELA 8. A tabela completa pode ser encontrada no Apêndice na TABELA I. I

TABELA 8 - MEDIDAS REAIS E SIMULADAS DO SISTEMA DE 30 BARRAS

tipo	n°	$Z_o(\text{pu})$			$Z(\text{pu})$		
		fase a	fase b	fase c	fase a	fase b	fase c
p_{km}	1	1,5843	1,5758	1,5462	1,5892	1,5914	1,5499
p_{km}	6	0,7083	0,7263	0,7181	0,7115	0,7093	0,7237
p_{km}	11	0,2925	0,2910	0,3028	0,2916	0,2898	0,2969
p_{km}	16	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0008	-0,0003	-0,0011
p_{km}	21	0,0256	0,0251	0,0210	0,0247	0,0264	0,0199
p_{km}	26	0,0646	0,0652	0,0693	0,0629	0,0667	0,0703
p_{km}	31	0,0628	0,0616	0,0638	0,0619	0,0606	0,0626
p_{km}	36	0,1822	0,1805	0,1844	0,1835	0,1839	0,1860
p_{km}	41	0,1910	0,1833	0,1817	0,1932	0,1800	0,1852
p_{mk}	1	-1,5327	-1,5515	-1,5136	-1,5681	-1,5462	-1,5226
p_{mk}	6	-0,6843	-0,6953	-0,6907	-0,6805	-0,6784	-0,6858
p_{mk}	11	-0,2925	-0,2910	-0,3028	-0,2927	-0,2829	-0,2953
p_{mk}	16	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0003
p_{mk}	21	-0,0255	-0,0250	-0,0209	-0,0256	-0,0241	-0,0215
p_{mk}	26	-0,0645	-0,0650	-0,0691	-0,0633	-0,0634	-0,0710
p_{mk}	31	-0,0622	-0,0609	-0,0631	-0,0636	-0,0621	-0,0628
p_{mk}	36	-0,1822	-0,1805	-0,1844	-0,1789	-0,1799	-0,1827
p_{mk}	41	-0,1906	-0,1832	-0,1810	-0,1870	-0,1853	-0,1796

q_{km}	1	-0,2154	0,0484	-0,0477	-0,2094	0,0493	-0,0463
q_{km}	2	0,0795	0,0453	0,1005	0,0808	0,0456	0,0966
q_{km}	6	0,0202	-0,0345	-0,0096	0,0215	-0,0363	-0,0098
q_{km}	11	-0,1020	-0,1026	-0,0978	-0,0992	-0,0993	-0,0994
q_{km}	16	0,3476	0,3555	0,3359	0,3527	0,3552	0,3313
q_{km}	21	0,0099	0,0126	0,0093	0,0118	0,0119	0,0110
q_{km}	26	0,0487	0,0461	0,0494	0,0500	0,0476	0,0481
q_{km}	31	0,0402	0,0397	0,0434	0,0397	0,0407	0,0441
q_{km}	36	0,0488	0,0504	0,0466	0,0505	0,0506	0,0458
q_{km}	41	-0,0085	0,0038	-0,0099	-0,0074	0,0042	-0,0108
q_{mk}	1	0,3095	0,0264	0,1270	0,3068	0,0262	0,1240
q_{mk}	6	0,0262	0,0819	0,0541	0,0254	0,0808	0,0522
q_{mk}	11	0,1214	0,1217	0,1187	0,1189	0,1209	0,1192
q_{mk}	16	-0,3327	-0,3409	-0,3215	-0,3319	-0,3485	-0,3207
q_{mk}	21	-0,0098	-0,0124	-0,0092	-0,0092	-0,0108	-0,0096
q_{mk}	26	-0,0482	-0,0456	-0,0488	-0,0477	-0,0452	-0,0501
q_{mk}	31	-0,0392	-0,0388	-0,0423	-0,0404	-0,0396	-0,0422
q_{mk}	36	-0,0346	-0,0367	-0,0325	-0,0350	-0,0386	-0,0307
q_{mk}	41	-0,0026	-0,0149	-0,0015	-0,0030	-0,0162	-0,0019
p_k	1	2,6304	2,6228	2,6163	2,6178	2,5687	2,6217
p_k	6	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0000	-0,0006
p_k	11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	-0,0016	-0,0001
p_k	16	-0,0350	-0,0350	-0,0350	-0,0334	-0,0350	-0,0363
p_k	21	-0,1750	-0,1750	-0,1750	-0,1777	-0,1747	-0,1725
p_k	26	-0,0350	-0,0350	-0,0350	-0,0352	-0,0343	-0,0340
q_k	1	-0,1359	0,0937	0,0529	-0,1335	0,0942	0,0530
q_k	6	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0007	-0,0003	-0,0010
q_k	11	0,2695	0,2686	0,2714	0,2679	0,2696	0,2712
q_k	16	-0,0180	-0,0180	-0,0180	-0,0182	-0,0192	-0,0176
q_k	21	-0,1120	-0,1120	-0,1120	-0,1086	-0,1128	-0,1112
q_k	26	-0,0230	-0,0230	-0,0230	-0,0218	-0,0216	-0,0228
v	1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0803	1,0636	1,0421
v	6	1,0081	1,0087	1,0087	1,0132	0,9994	1,0131
v	11	1,0820	1,0820	1,0820	1,1022	1,1007	1,0965
v	16	1,0136	1,0152	1,0144	1,0211	0,9991	0,9942
v	21	1,0020	1,0037	1,0051	1,0218	0,9854	1,0024
v	26	0,9649	0,9658	0,9661	0,9724	0,9640	0,9797

Fonte: o autor (2017).

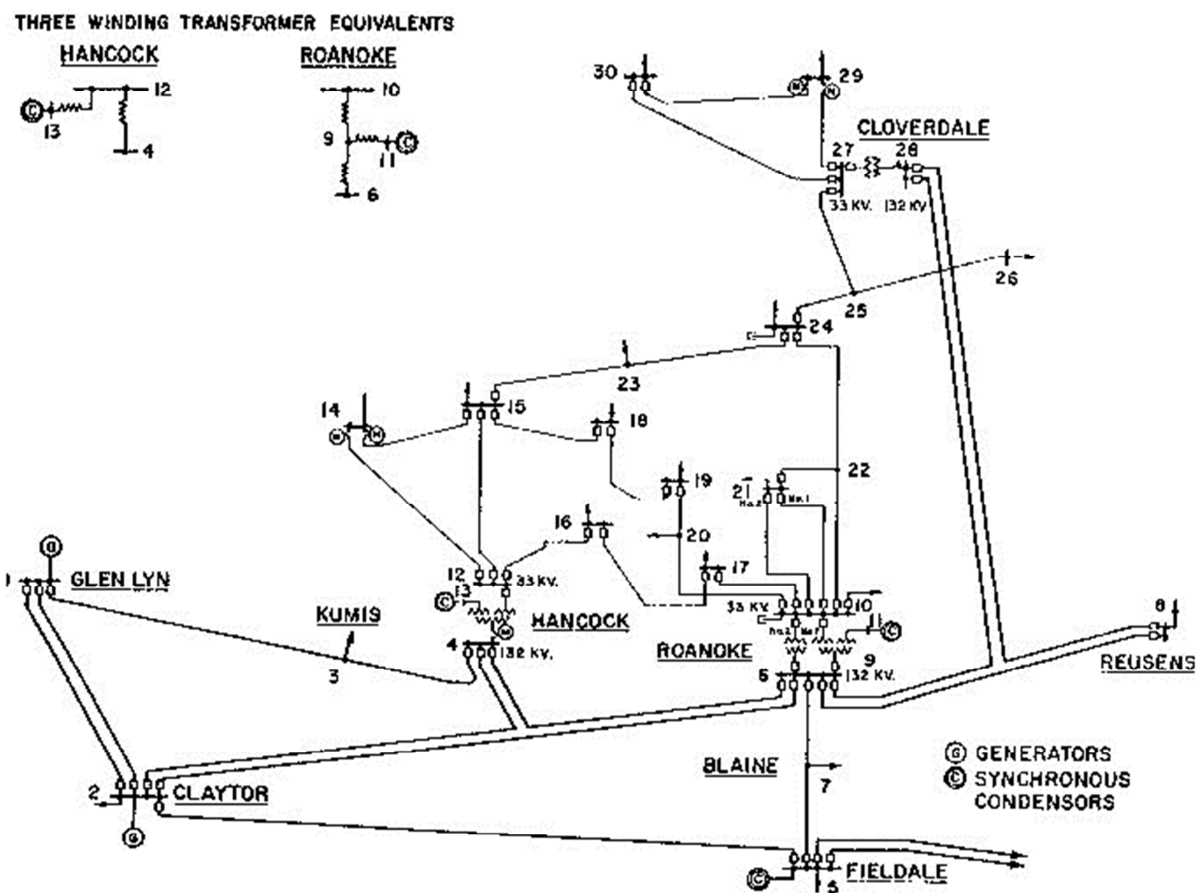
5.3 TESTE ESTIMADOR DE ESTADOS TRIFÁSICO

Após teste dos resultados do simulador de medidas é interessante aplicá-lo ao estimador de estados trifásico. Devido a aplicabilidade do simulador em sistemas de transmissão e distribuição, serão utilizados um sistema de cada tipo de rede para o estudo do estimador.

5.3.1 Sistema teste 1 – Sistema de Transmissão

O Sistema 1 utilizado é o sistema de 30 barras do IEEE, representado pela FIGURA 5.

FIGURA 5 – SISTEMA-TESTE IEEE 30 BARRAS



Fonte: Universidade de Washington (2017).

O sistema-teste de 30 barras do IEEE é um sistema de transmissão. É característico de um sistema de transmissão cargas equilibradas, tendo a potência ativa e reativa demandada do sistema a mesma para as 3 fases. No entanto, um desbalanço entre as impedâncias de linha costumam aparecer neste tipo de sistema, que costuma ser ignorado na modelagem de sequência positiva (HANSEN; DEBBS, 1995).

Por ser um sistema inicialmente monofásico, foram necessárias alterações para torná-lo verosímil a um sistema trifásico, gerando um desequilíbrio entre as fases nos dados de linha da rede original. Assim, os dados de entrada utilizados para a simulação deste sistema são:

TABELA 9 – PARÂMETROS DO SISTEMA-TESTE 30 BARRAS

Nº	DE	PARA	R (Ω)	X (Ω)
----	----	------	----------------	----------------

trecho								
			a	b	c	a	b	c
1	1	2	0,03523	0,03610	0,03739	0,10897	0,10311	0,11294
2	1	3	0,08530	0,08741	0,08725	0,31272	0,31100	0,31385
3	2	4	1,08176	1,08266	1,08328	0,32651	0,33073	0,32911
4	3	4	0,02361	0,02418	0,02518	0,07871	0,07559	0,06469
5	2	5	0,08080	0,08852	0,09362	0,37897	0,37345	0,37688
6	2	6	0,10745	0,11345	0,11170	0,33624	0,33799	0,33493
7	4	6	0,02258	0,02321	0,01797	0,08357	0,07740	0,07982
8	5	7	0,08735	0,09241	0,08790	0,22290	0,22117	0,22355
9	6	7	0,05097	0,04864	0,05076	0,15713	0,15381	0,15074
10	6	8	0,02355	0,02413	0,02173	0,08556	0,07817	0,08029
11	6	9	0,00000	0,00000	0,00000	0,39780	0,39646	0,39340
12	6	10	0,00000	0,00000	0,00000	1,05744	1,05847	1,06328
13	9	11	0,00000	0,00000	0,00000	0,39353	0,39847	0,39704
14	9	10	0,00000	0,00000	0,00000	0,20878	0,20631	0,20863
15	4	12	0,00000	0,00000	0,00000	0,48727	0,48312	0,48810
16	13	12	0,00000	0,00000	0,00000	0,26415	0,26633	0,26762
17	14	12	0,23372	0,24050	0,22766	0,48462	0,48647	0,48839
18	12	15	0,13276	0,12708	0,12907	0,24283	0,25144	0,25561
19	16	12	0,17497	0,17820	0,17913	0,38128	0,37746	0,37969
20	14	15	0,42214	0,41586	0,42229	0,37720	0,38594	0,38313
21	16	17	0,09615	0,09999	0,10175	0,36858	0,36359	0,36718
22	18	15	0,20532	0,20759	0,20736	0,41444	0,41518	0,41440
23	18	19	0,11974	0,12246	0,11886	0,24297	0,24332	0,24542
24	19	20	0,06078	0,06752	0,06475	0,12440	0,13132	0,12915
25	10	20	0,17809	0,18099	0,18004	0,40012	0,39883	0,39950
26	10	17	0,06275	0,06545	0,06449	0,15647	0,15786	0,15958
27	10	21	0,06699	0,06420	0,06432	0,14297	0,14603	0,14177
28	10	22	0,14203	0,13361	0,13838	0,28925	0,28690	0,28899
29	21	22	0,01624	0,02515	0,02468	0,04532	0,04297	0,04050
30	23	15	0,19044	0,19023	0,18298	0,38516	0,38714	0,38381
31	22	24	0,22075	0,21243	0,21205	0,33927	0,33996	0,33760
32	23	24	0,25162	0,24854	0,25262	0,51271	0,51365	0,51433
33	24	25	0,36101	0,36155	0,35691	0,62674	0,62876	0,62726
34	25	26	0,48583	0,48478	0,48696	0,72911	0,72461	0,72909
35	25	27	0,20976	0,21084	0,20776	0,39528	0,39903	0,39667
36	28	27	0,00000	0,00000	0,00000	0,75594	0,75592	0,74758
37	27	29	0,41815	0,42161	0,41222	0,78692	0,78657	0,79210
38	27	30	0,60828	0,60598	0,60864	1,15219	1,14680	1,15022

39	29	30	0,45881	0,45934	0,45382	0,86490	0,86011	0,86446
40	8	28	0,11971	0,12153	0,12024	0,37862	0,38543	0,38078
41	6	28	0,03309	0,03338	0,02939	0,11898	0,11280	0,11584

Fonte: o autor (2017).

Para uma análise dos resultados obtidos, serão realizados dois casos distintos para o mesmo sistema. O que diferenciaram os casos entre si é que, no Caso 1 as medidas são perfeitas (sem a inclusão de erros de telemetria simulados pelo gerador de medidas) e no Caso 2, a análise trifásica propriamente dita do estimador de estado, considerando os mesmos erros de medida incluídos pelo simulador de medidas.

Para todos os casos, tendo havido inclusão de erros ou não, o conjunto de medidas Z terá sempre a mesma dimensão de (4.18). Para as 41 linhas estão disponíveis todas as medidas de fluxo de potência ativa e reativa $t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c, t_{mk}^a, t_{mk}^b, t_{mk}^c, u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c, u_{mk}^a, u_{mk}^b, u_{mk}^c$. Para as 30 barras estão disponíveis todas as medidas de injeção de potência ativa e reativa $P_k^a, P_k^b, P_k^c, Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c$, módulo de tensão V_k^a, V_k^b, V_k^c e ângulo de fase $\theta_k^a, \theta_k^b, \theta_k^c$.

O estimador de estado utiliza em seu estudo o conjunto de medidas Z^a, Z^b e Z^c descrito em (4.22). Por ser um estudo, a condição de observabilidade é totalmente atendida para uma visão mais ampla da aplicação do estimador. Para todas as 41 linhas são utilizadas todas as medidas de fluxo de potência ativa e reativa $t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c, u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c$. Para as 30 barras são utilizadas todas as medidas de injeção de potência ativa e reativa $P_k^a, P_k^b, P_k^c, Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c$ e módulo de tensão V_k^a, V_k^b, V_k^c .

5.3.1.1 Caso 1

No caso 1 não são adicionados erros ao conjunto de medidas. Como estudado previamente, o estimador de estado tem como objetivo encontrar os estados do sistema (tensão e ângulo de fase de cada barra), filtrando os possíveis erros de telemetria. Desta forma, ao utilizar o estimador de estado sobre um conjunto de medidas sem erros, deve-se encontrar os mesmos estados originais, ou seja, aqueles obtidos diretamente através do fluxo de potência.

Os resultados do Caso 1 são apresentados na TABELA I. **A** e TABELA I. **B** no Apêndice. Os valores de ângulo de fase θ são em graus e tensão V em pu. Por razões comparativas os resultados estão divididos em duas partes: o resultado encontrado pelo fluxo de potência, que são considerados os valores perfeitos, antes da adição gerados pelo simulador de medidas, e os estados do sistema obtidos através do estimador de estado.

Os valores esperados para os estados do sistema obtidos por um estimador sem simplificações em seu processo deveriam ser os mesmos do fluxo de carga a partir do qual foram geradas as medidas perfeitas, pois não há, nesse caso, nenhum erro para filtrar no conjunto de medidas perfeitas.

No entanto, devido ao modelo desacoplado rápido utilizado no estimador de estado, conforme previsto na literatura, ocorrem pequenos erros devido a simplificações do método que permitem que os cálculos sejam mais rápidos computacionalmente.

Observa-se que os valores são praticamente os mesmos entre o fluxo de potência e o estimador. A diferença entre os valores obtidos do fluxo de potência e os estados do sistema obtidos pelo estimador de estado é muito pequena, podendo ser desprezada. Esta diferença ser tão pequena demonstra que o estimador de estados trifásico está funcionando como previsto para uma situação em que seus dados de entrada são medidas sem nenhum ruído ou erro.

Foram gerados gráficos que comparam os valores do fluxo de potência, o resultado obtido pelo estimador neste caso e os valores obtidos pelo Caso 2, e estão apresentados na seção 5.3.3, junto com uma análise crítica mais específica das imagens.

5.3.1.2 Caso 2

O Caso 2 considera o estimador trifásico em sua plena funcionalidade, incluindo os erros de medidas adicionados pelo simulador de medidas e os cálculos e análises aplicados nas três fases, de maneira independente como proposto para este estimador.

O teste é feito com o mesmo sistema-teste de 30 barras, porém com a adição dos erros nas medidas das três fases através do simulador, de forma que estas deixam de ser perfeitas.

Os valores das medidas antes e após a adição de erros a partir do simulador de erros, além do seu desvio, encontra-se no Apêndice na TABELA I. **I**. Nesta tabela está mostrada também os valores de $|Z - Z_o|$ e $3\sigma_z$, que conforme mostrado na seção 4.1.4 devem ter a relação $|Z - Z_o| < 3\sigma_z$ para que os erros sejam considerados ruídos normais, excluindo a possibilidade de alguma medida carregar um erro grosseiro ou erro extremo.

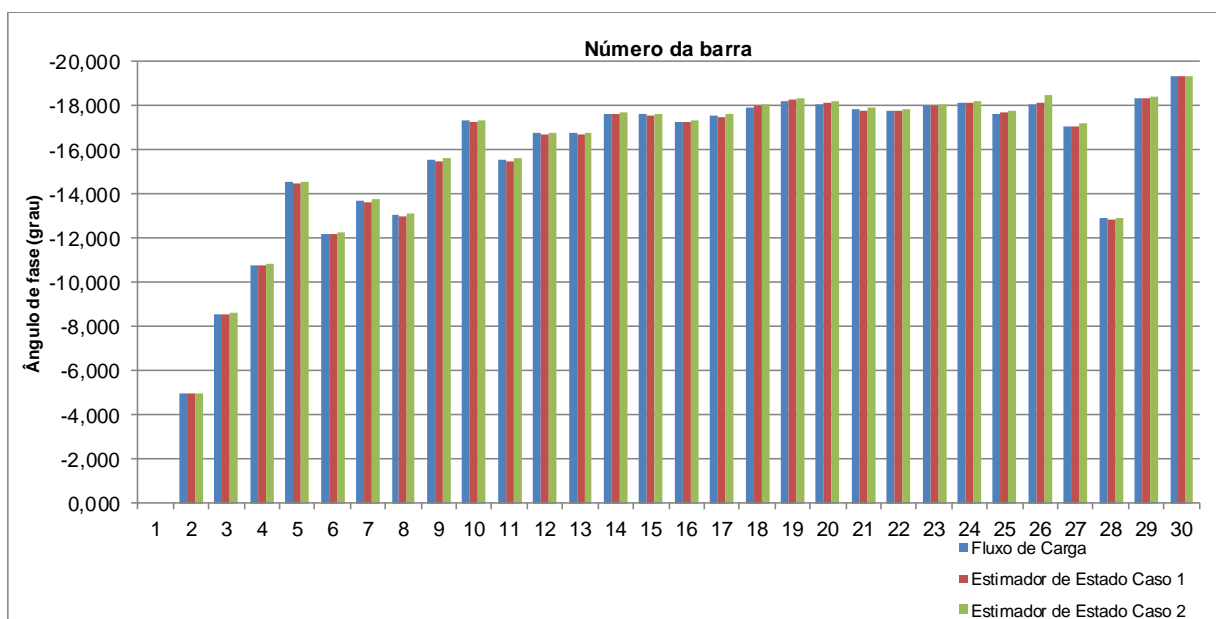
Os valores da coluna de valores $3\sigma_z - |Z - Z_o|$ devem ser todos positivos, para provar que todos os erros podem ser classificados como ruído normal.,

Com os dados de entrada do estimador de estados trifásicos definidos, os resultados obtidos são os apresentados no Apêndice, nas TABELA I. **C** e TABELA I. **D**. Como no Caso 1, os valores são apresentados entre o fluxo de potência do simulador de medidas e o estimador de estado trifásico. Porém, a diferença ocorre nos dados de entrada do estimador de estado são os resultados do fluxo de potência com a adição de erros do simulador de medidas.

Foram gerados gráficos comparativos entre o resultado do fluxo de potência trifásico (valores perfeitos), os estados do sistema obtidos no Caso 1 (sem a adição de erros nas medidas) e os estados do sistema obtidos no Caso 2, e podem ser observados em FIGURA 6, FIGURA 7, FIGURA 8, FIGURA 9, FIGURA 10 e FIGURA 11.

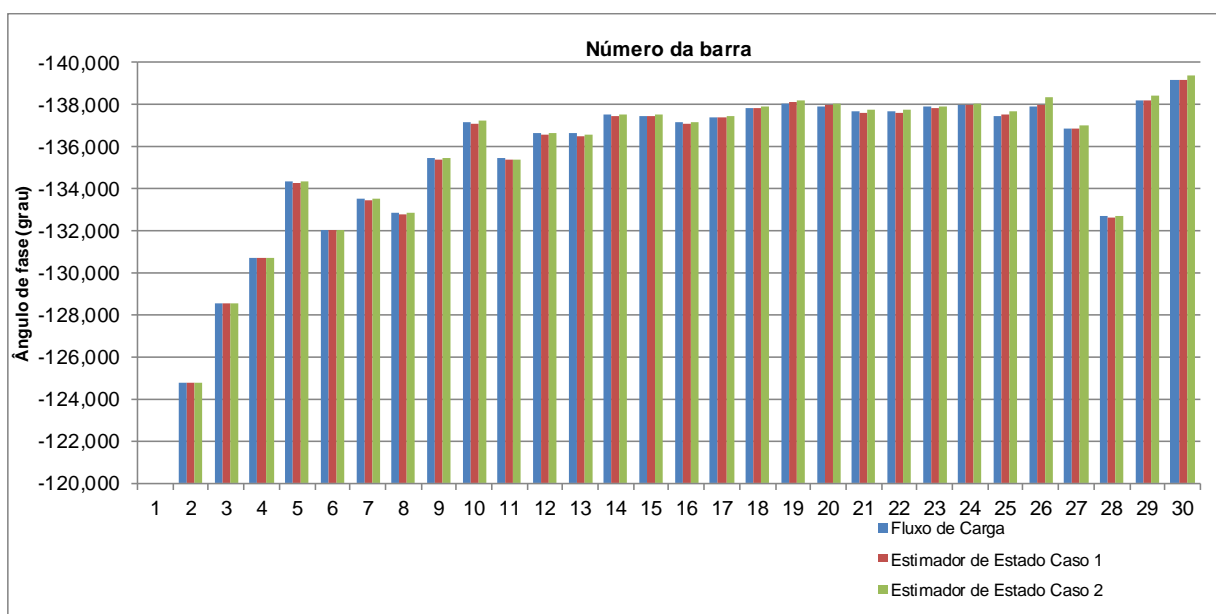
Os resultados estão separados entre fases, para visualização mais clara.

FIGURA 6 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “A” SISTEMA DE 30 BARRAS



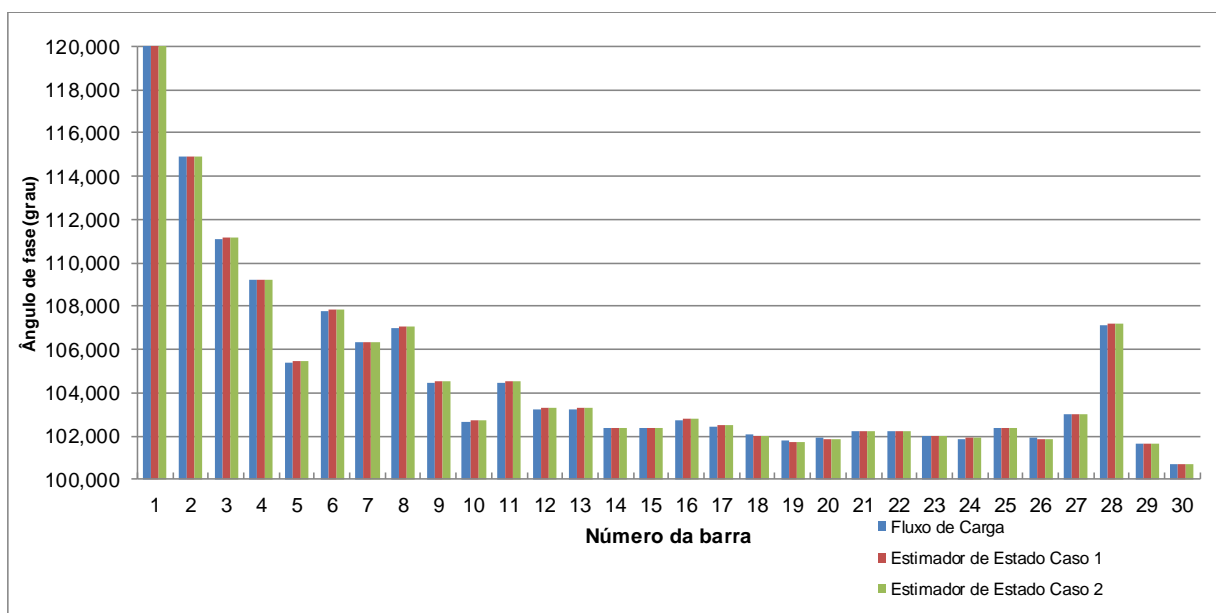
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 7 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “B” SISTEMA DE 30 BARRAS



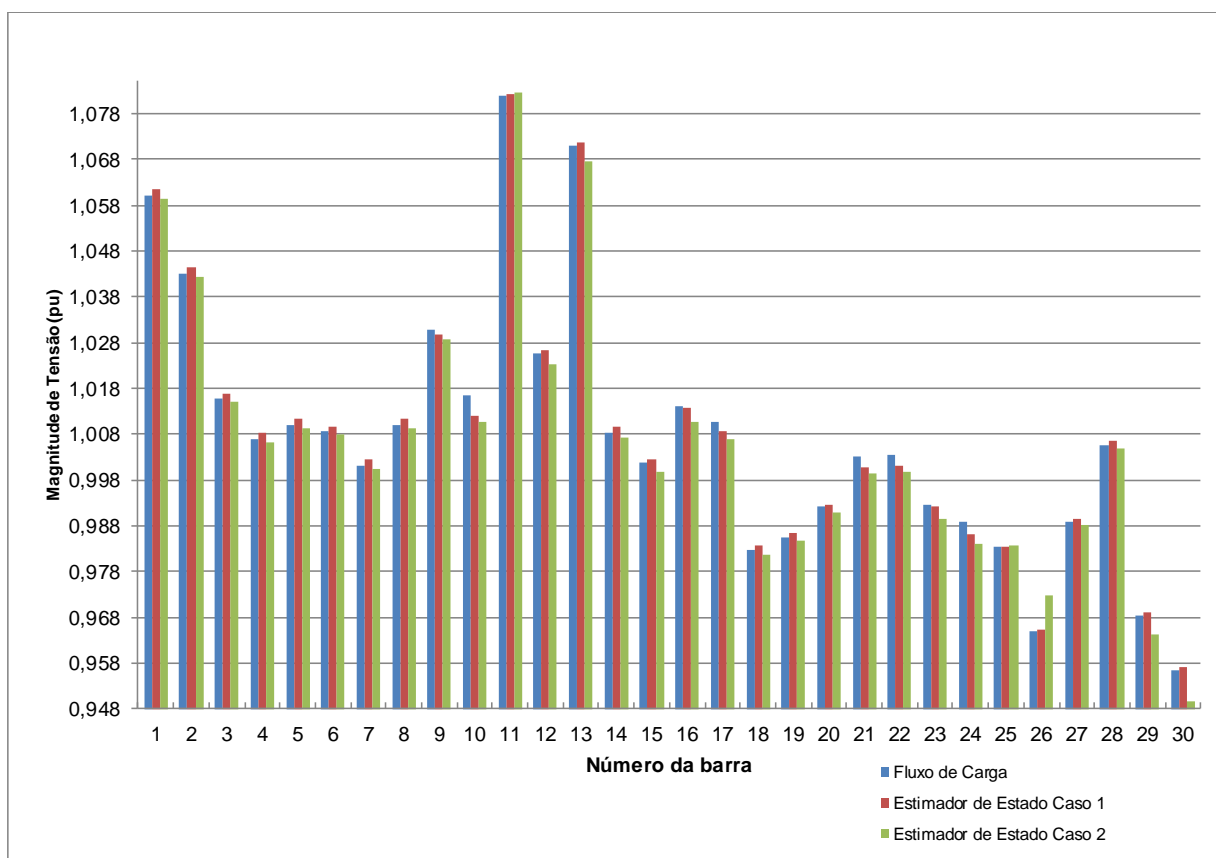
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 8 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “C” SISTEMA DE 30 BARRAS



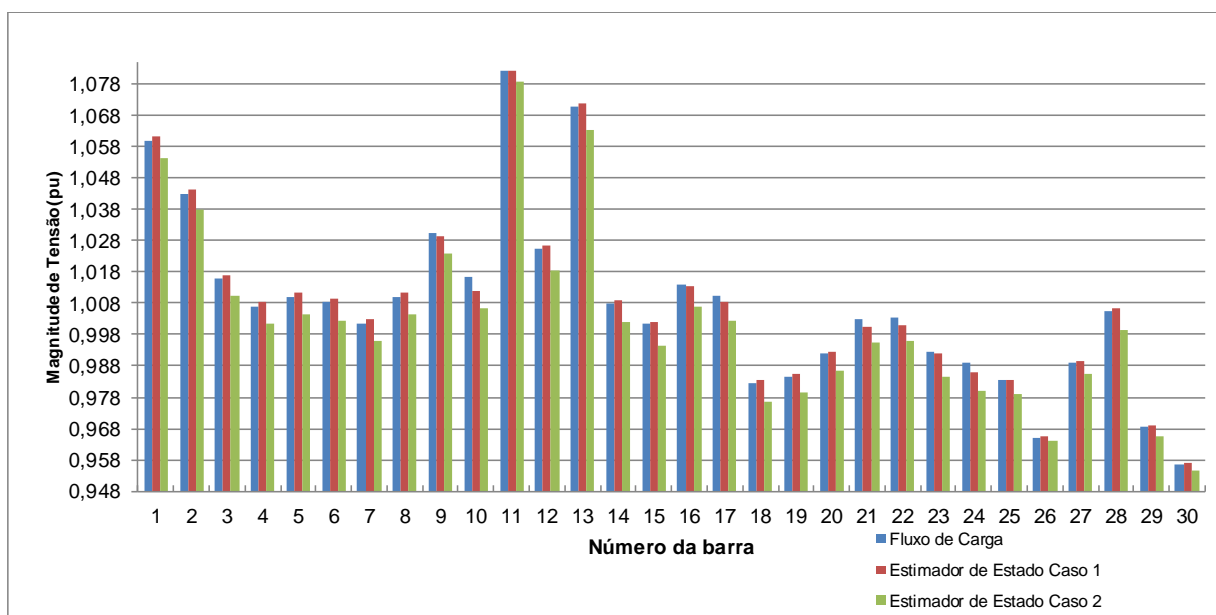
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 9 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “A”
SISTEMA DE 30 BARRAS



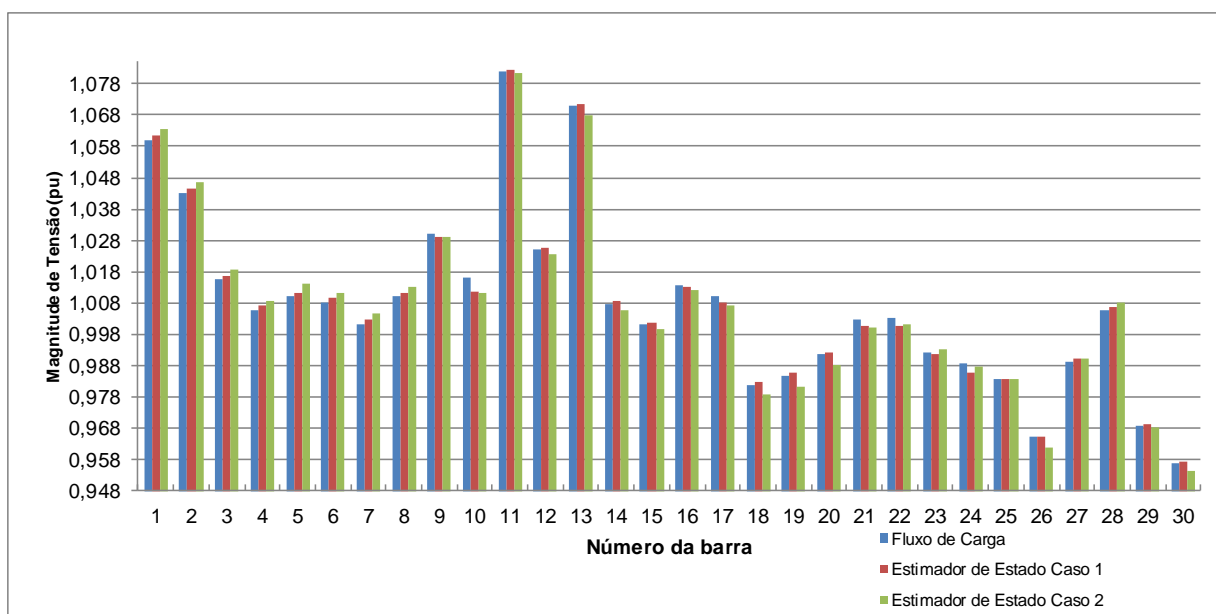
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 10 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “B”
SISTEMA DE 30 BARRAS



Fonte: O autor (2017).

FIGURA 11 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “C”
SISTEMA DE 30 BARRAS



Fonte: O autor (2017).

Como comentado na seção 5.3.3, os valores do fluxo de potência e do estimador de estados são praticamente os mesmos, tanto para o ângulo de fase quanto

TABELA 10 - DEMANDA DO SISTEMA-TESTE 69 BARRAS

Barra	Pd			Qd		
	a	b	c	a	b	c
1						
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	-0.00101	0.00002	-0.00005	0.00476	0.00447	0.00491
7	-0.00375	-0.00281	-0.00132	0.05055	0.04858	0.04937
8	-0.00597	-0.00574	-0.00672	0.09214	0.09084	0.09177
9	-0.00216	-0.0015	-0.00267	0.03837	0.03631	0.0373
10	0.00019	-0.00113	-0.00065	0.03408	0.03564	0.03354
11	-0.00818	-0.00861	-0.00888	0.17884	0.17696	0.17732
12	-0.00777	-0.01011	-0.00966	0.17852	0.17872	0.17772
13	0	-0.00065	-0.00086	0.00997	0.00902	0.01027
14	0.00042	-0.0008	0.00009	0.00899	0.00995	0.01005
15	0	0	0	0	0	0
16	-0.00088	-0.00113	-0.00024	0.05593	0.05339	0.05471
17	0.00329	0.00102	0.00266	0.06767	0.06952	0.07018
18	0.00192	0.00311	0.00228	0.06833	0.06919	0.07062
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0.00285	0.0012	0.00268
21	-0.00661	-0.00534	-0.00489	0.13954	0.13882	0.13959
22	0.00069	-0.00169	0.00136	0.00465	0.00557	0.00577
23	0	0	0	0	0	0
24	-0.00062	-0.00144	0.00073	0.03577	0.03462	0.03644
25	0	0	0	0	0	0
26	-0.00136	0.00089	-0.002	0.01764	0.01755	0.01697
27	-0.00129	-0.00207	-0.00033	0.0163	0.01736	0.01682
28	-0.00113	-0.00215	-0.0029	0.03034	0.03241	0.03173
29	-0.00419	-0.00245	-0.00293	0.03216	0.03137	0.03258
30	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
33	-0.00023	0.00017	-0.0029	0.0166	0.01755	0.01786
34	-0.00294	-0.00167	-0.00025	0.02387	0.02307	0.02423
35	0.00115	0.00137	-0.00049	0.00827	0.00502	0.00731
36	-0.00225	-0.00263	-0.00104	0.03204	0.03224	0.03152

37	-0.00083	-0.00313	-0.00173	0.03223	0.03134	0.03215
38	0	0	0	0	0	0
39	-0.00183	-0.00069	-0.00015	0.03054	0.0293	0.02832
40	-0.0001	-0.00081	-0.00171	0.02929	0.02983	0.02912
41	-0.00067	-0.00137	0.00096	0.00326	0.00115	0.00117
42	0	0	0	0	0	0
43	-0.00129	-0.00234	-0.00122	0.00902	0.00769	0.00793
44	0	0	0	0	0	0
45	0.00045	-0.00074	-0.00136	0.04853	0.04654	0.04701
46	-0.00079	-0.00061	-0.00056	0.04806	0.0464	0.04743
47	0	0	0	0	0	0
48	-0.00498	-0.00251	-0.00374	0.09573	0.0974	0.09913
49	-0.02567	-0.02415	-0.02323	0.47183	0.47159	0.47366
50	-0.0227	-0.02348	-0.02324	0.47106	0.47162	0.47196
51	-0.00222	-0.00321	0.00022	0.05	0.04831	0.04843
52	-0.00049	0.00202	-0.00119	0.0048	0.00431	0.00282
53	-0.00085	-0.0019	-0.00145	0.00377	0.00376	0.00551
54	-0.00079	-0.00094	-0.00257	0.03295	0.03316	0.03143
55	-0.00134	-0.00194	-0.00067	0.02748	0.03009	0.02941
56	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
59	-0.00736	-0.00504	-0.00815	0.12298	0.12259	0.12268
60	0	0	0	0	0	0
61	-0.0751	-0.07691	-0.07612	1.5285	1.52644	1.52711
62	-0.00317	-0.00055	-0.00226	0.03722	0.03791	0.03861
63	0	0	0	0	0	0
64	-0.01337	-0.01514	-0.01466	0.27864	0.27886	0.281
65	-0.00315	-0.0036	-0.00283	0.07054	0.07057	0.07201
66	-0.00004	-0.00211	-0.00217	0.02133	0.02116	0.02315
67	-0.00074	-0.00132	-0.00118	0.02177	0.02266	0.0224
68	-0.00258	-0.00264	-0.00125	0.03279	0.03516	0.03414
69	-0.00013	-0.00204	-0.00059	0.03373	0.03424	0.03479

Fonte: o autor (2017).

O sistema de 69 barras é originalmente monofásico. Para executá-lo no modelo trifásico foram utilizados os mesmos dados de linha originais para as três fases. Os dados de barra também foram repetidos para as três fases. Com relação aos desbalanceamentos entre as potências ativas e reativas demandadas pelo sistema, os

valores apresentados na TABELA 10 foram considerados para as simulações envolvendo o simulador de medidas e o estimador de estado trifásicos.

Para todos os casos, tendo havido inclusão de erros ou não, o conjunto de medidas Z terá sempre a mesma dimensão de (4.18). Para as 68 linhas estão disponíveis todas as medidas de fluxo de potência ativa e reativa $t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c, u_{mk}^a, u_{mk}^b, u_{mk}^c, u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c$. Para as 69 barras estão disponíveis todas as medidas de injeção de potência ativa e reativa $P_k^a, P_k^b, P_k^c, Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c$, módulo de tensão V_k^a, V_k^b, V_k^c e ângulo de fase $\theta_k^a, \theta_k^b, \theta_k^c$.

O estimador de estado utiliza em seu estudo o conjunto de medidas Z^a, Z^b e Z^c descrito em (4.20). Por ser um estudo, a condição de observabilidade é totalmente atendida para uma visão mais ampla da aplicação do estimador. Para todas as 68 linhas são utilizadas todas as medidas de fluxo de potência ativa e reativa $t_{km}^a, t_{km}^b, t_{km}^c, u_{mk}^a, u_{mk}^b, u_{mk}^c, u_{km}^a, u_{km}^b, u_{km}^c$. Para as 69 barras são utilizadas todas as medidas de injeção de potência ativa e reativa $P_k^a, P_k^b, P_k^c, Q_k^a, Q_k^b, Q_k^c$ e módulo de tensão V_k^a, V_k^b, V_k^c .

5.3.2.1 Caso 1

O Caso 1 para o sistema de 69 barras é o mesmo apresentado anteriormente para o de 30 barras, ou seja, os dados de entrada do estimador de estado vem do fluxo de carga sem a adição de erros.

Os resultados do Caso 1 são apresentados na TABELA I. E e TABELA I. F no Apêndice. Os valores de ângulo de fase θ são em graus e tensão V em pu. Por razões comparativas os resultados estão divididos entre o resultado encontrados pelo fluxo de potência do simulador de medidas, que são considerados os valores perfeitos, antes da adição gerados pelo simulador de medidas, e os estados do sistema obtidos através do estimador de estado.

Como na análise do Caso 1 do sistema de 30 barras, o valor esperado para o estimador em seu pleno funcionamento tem que ser o mesmo do conjunto de medidas perfeitas, pois não há nenhum erro para filtrar, porém são aceitos os erros, já previstos na literatura, devido as simplificações do modelo desacoplado rápido.

Apesar de um bom resultado para as tensões, quando analisamos os ângulos de fases percebe-se já um distanciamento maior dos valores esperados para a fase α . Estas distorções/erros nos resultados eram esperados uma vez que a formulação desacoplada não é adequada para sistemas de distribuição, como previsto e discutido na literatura. Esses problemas são acentuados nos próximos casos onde os erros de medição passam a ser considerados, como mostrados nas próximas seções.

5.3.2.2 Caso 2

Este caso, de forma semelhante ao sistema anterior, é uma análise do comportamento do estimador de estados trifásico ao aplicar os erros trifásicos no sistema.

O teste é feito com o sistema de 69 barras utilizado anteriormente, e como no sistema de 30 barras haverá a adição dos erros nas medidas através do simulador proposto, de forma que estas deixam de ser perfeitas.

As medidas utilizadas obtidas pela adição de erros pelo simulador de medidas no resultado do fluxo de potência podem ser observados no Apêndice. A diferença percentual entre os valores do fluxo de potência ativo e reativo e as medidas utilizadas para o estimador de estado obtidas a partir do simulador de medidas parece alta em relação ao sistema de 30 barras. No entanto, estes valores estão dentro da proposta de (Albertini, 2010) e discutido na seção 4.1.4, quanto a classificação de erro normal, não causando um resultado diferente do obtido na telemetria de um sistema de distribuição em tempo real.

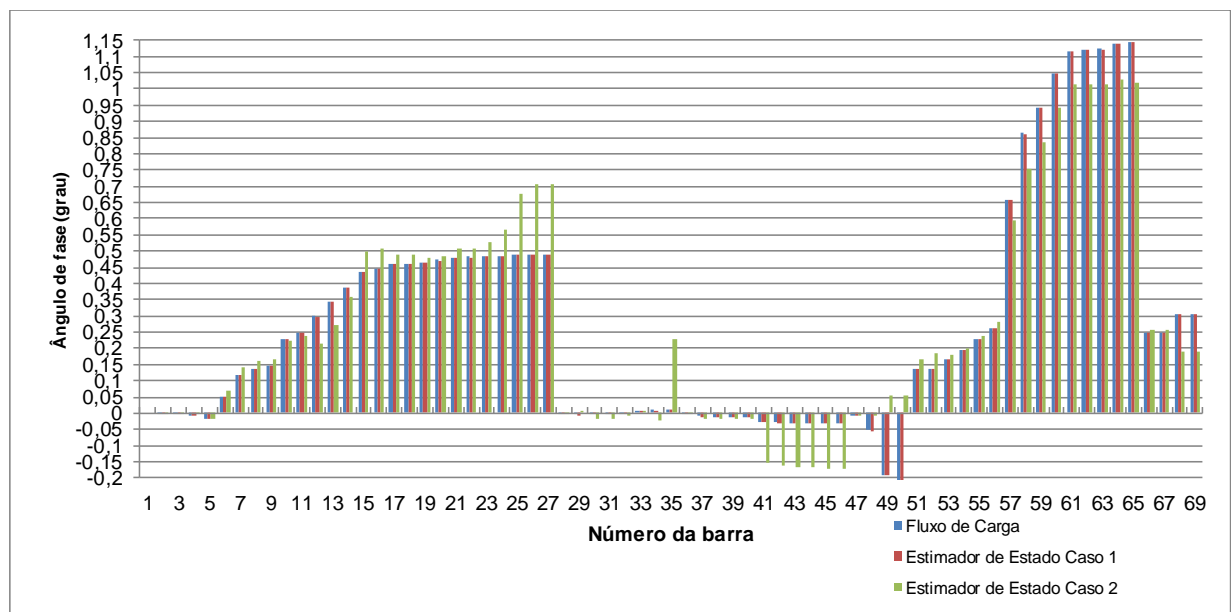
Com os dados de entrada do estimador de estados trifásicos definidos, os resultados obtidos são os apresentados no Apêndice, nas TABELA I. **G** e TABELA I. **H**. Como no Caso 1, os valores são apresentados entre o fluxo de potência do simulador de medidas e o estimador de estado trifásico. Porém, a diferença ocorre nos dados de entrada do estimador de estado são os resultados do fluxo de potência com a adição de erros do simulador de medidas.

Foram gerados gráficos comparativos entre o resultado do fluxo de potência trifásico do simulador de medidos (valores perfeitos), os estados do sistema obtidos no

Caso 1 (sem a adição de erros nas medidas) e os estados do sistema obtidos no Caso 2, e podem ser observados em FIGURA 13, FIGURA 14, FIGURA 15, FIGURA 16, FIGURA 17, e FIGURA 18..

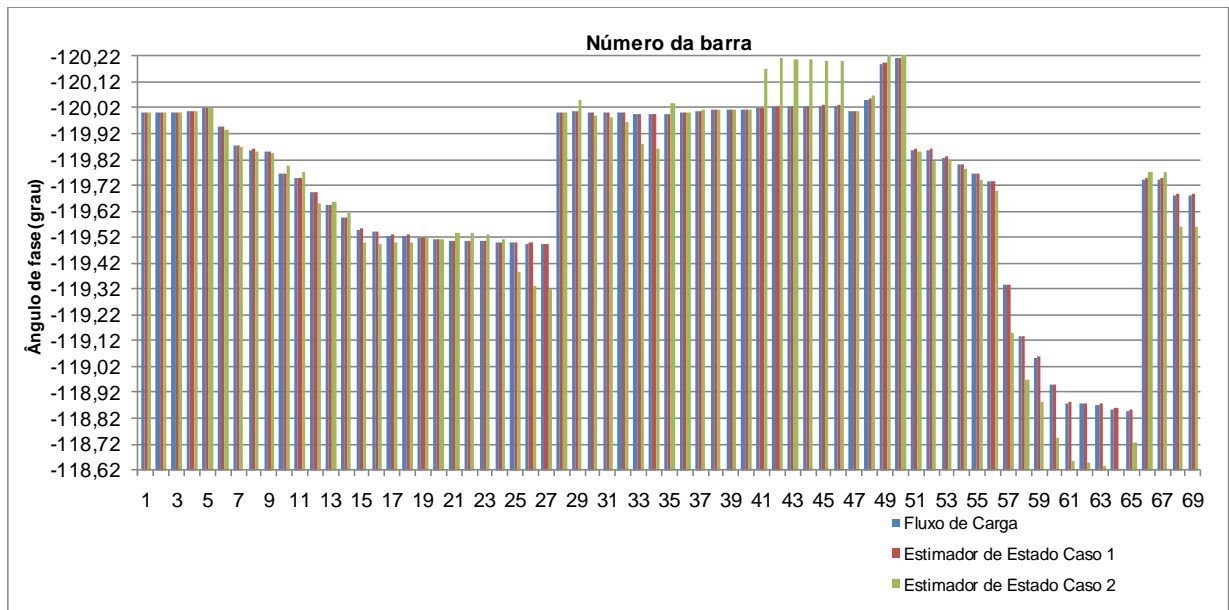
Os resultados estão separados entre fases, para visualização mais clara.

FIGURA 13 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “A” SISTEMA DE 69 BARRAS



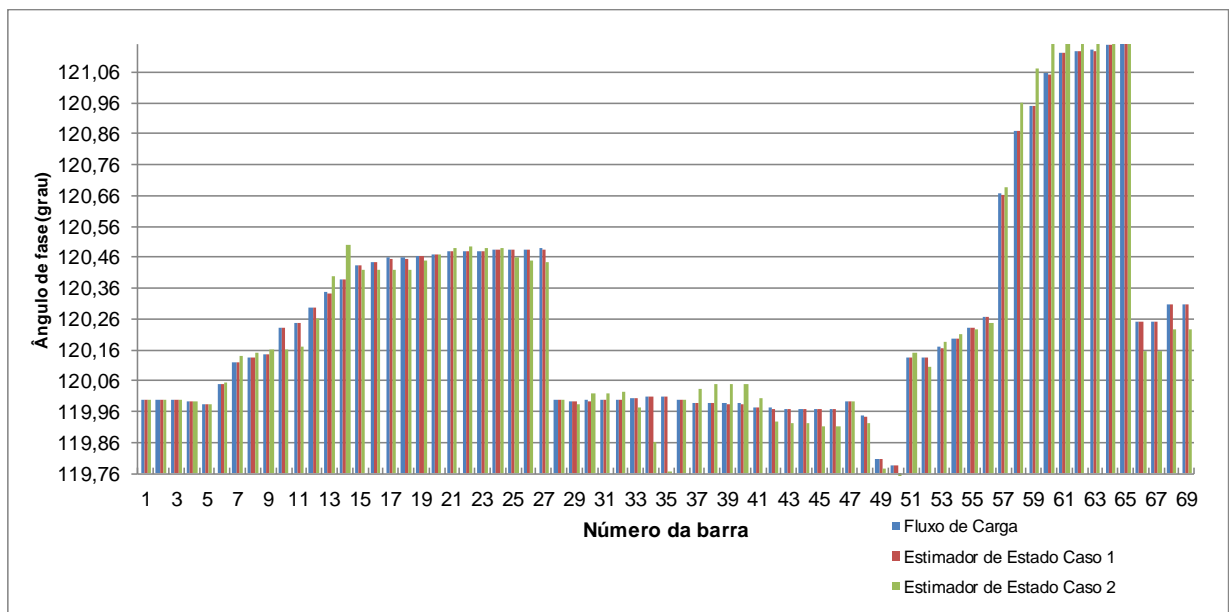
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 14 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “B” SISTEMA DE 69 BARRAS



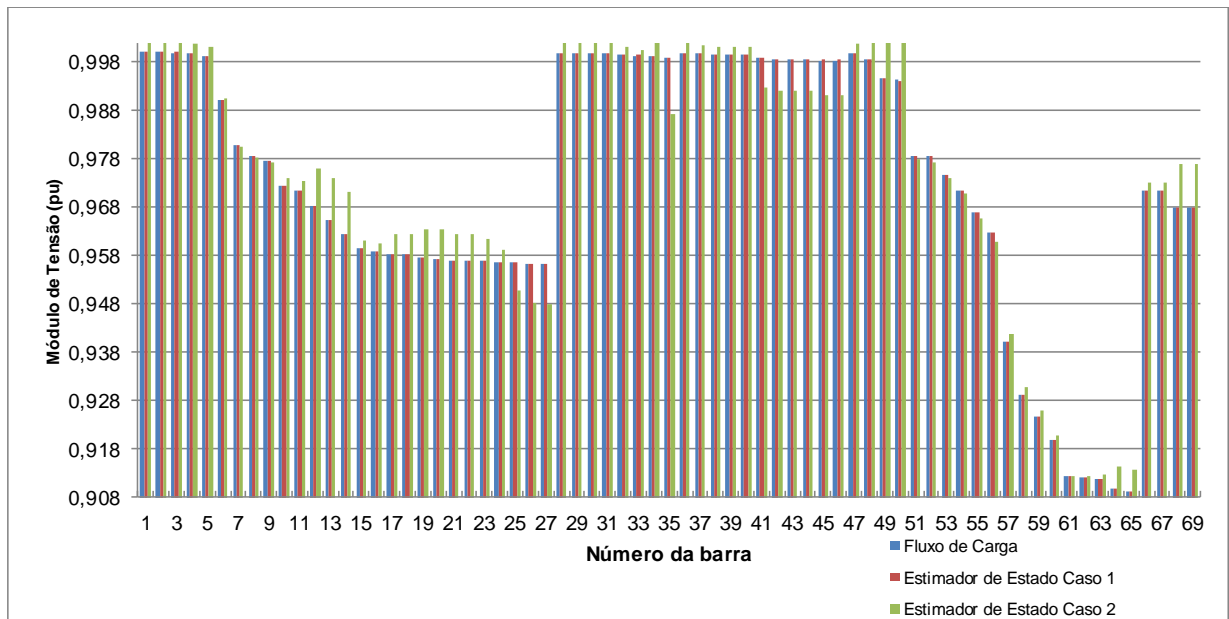
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 15 – GRÁFICO RESULTADOS ÂNGULO DE FASE PARA FASE “C” SISTEMA DE 69 BARRAS



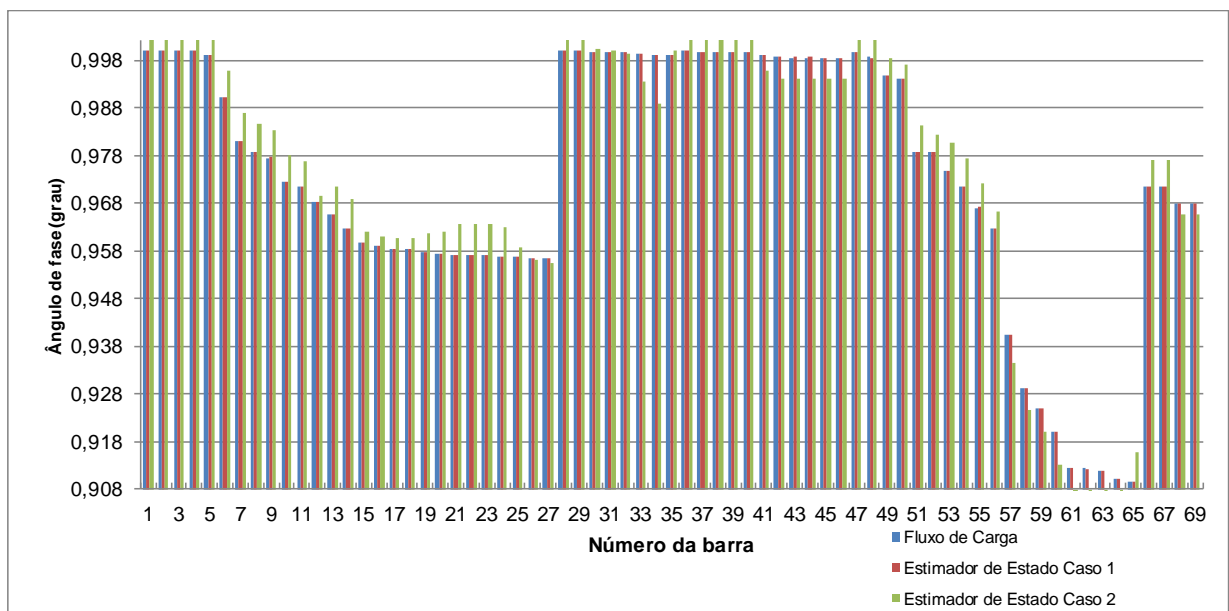
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 16 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “A” SISTEMA DE 69 BARRAS



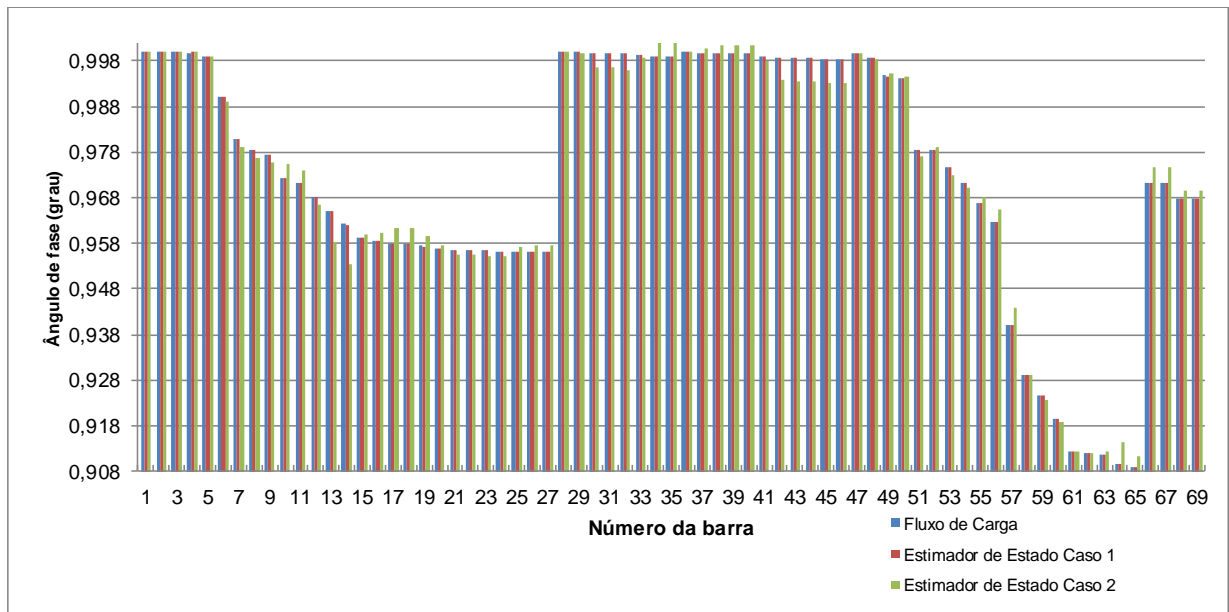
Fonte: O autor (2017).

FIGURA 17 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “B”
SISTEMA DE 69 BARRAS



Fonte: O autor (2017).

FIGURA 18 – GRÁFICO RESULTADOS MAGNITUDE DE TENSÃO PARA FASE “C”
SISTEMA DE 69 BARRAS



Fonte: O autor (2017).

Para o estimador de estado trifásico com a adição de erros do Caso 2 já observamos números mais discrepantes comparativamente, principalmente na fase α do ângulo de fase na FIGURA 13, onde em algumas barras específicas os valores encontrados tiveram uma grande diferença.

Esta diferença pode ocorrer por várias razões, incluindo a não utilização da medida de ângulo na entrada do estimador, que daria um melhor resultado para este parâmetro, somada com a já prevista dificuldade de resposta devido a natureza do sistema, por ser de distribuição.

Não existe nenhuma relação entre as barras com problemas no ângulo de fase. Algumas possuem susceptância shunt (bancos de capacitores) e outras não, enquanto potência gerada ativa e reativa estavam presentes nos dados de entrada de algumas dessas barras, mas de outras não.

Nos resultados de magnitude de tensão percebem-se erros mais significativos do que no sistema de transmissão de 30 barras. Ocorrendo em todas as fases, vemos os valores obtidos pelo caso 2 com uma diferença maior do que ocorreu para caso 1, porém com maior ocorrência na fase “a” da FIGURA 16. Este resultado pode ser

atribuído a característica do sistema de distribuição, que precisa de ferramentas mais aprimoradas para alcançar um resultado mais satisfatório.

Outros sistemas de distribuição foram testados utilizando o simulador de medidas e o estimador de estados trifásicos propostos. A TABELA 11 apresenta um resumo qualitativo do processo de convergência e dos resultados obtidos.

TABELA 11 – SISTEMAS-TESTE UTILIZADOS PARA ESTUDO DE ESTIMADOR DE ESTADO

Sistema-teste	Tipo	Convergência	Resultados satisfatórios
Ilustrativo 2 barras	-	Não	-
12 barras com GD	Distribuição	Não	-
30 barras IEEE	Transmissão	Sim	Sim
69 barras IEEE	Distribuição	Sim	Parcialmente
33 barras IEEE	Distribuição	Não	-
57 barras IEEE	Transmissão	Sim	Sim

Fonte: o autor (2017).

Os sistemas de transmissão apresentaram bons resultados de convergência. No entanto, os sistemas de distribuição apresentavam resultados parcialmente satisfatórios, ou apenas não convergiam.

5.4 CONCLUSÕES

Os sistemas de 2 e 12 barras utilizados nos testes do simulador de medidas foram aplicados ao estimador de estado, no entanto não convergiram. Isto ocorre devido à falta de uma ferramenta apropriada à distribuição, como a normalização complexa que se encontra no fluxo de potência trifásico, que possibilitaram resultados bem mais coerentes no simulador de medidas.

O sistema ilustrativo de 2 barras utiliza a normalização complexa para alcançar a convergência durante o processo de fluxo de potência, sendo que pela normalização convencional está não é atingida. O mesmo ocorreu com o estimador de estados, que por não utilizar de normalização complexa também não alcançou convergência neste sistema.

Já no sistema de 12 barras a diferença mostrada na TABELA 5 mostra que houve mais dificuldade para o sistema convergir para a normalização convencional do

que para a complexa, apesar da convergência ter sido alcançada para ambos os casos. No entanto, ao ser utilizado no estimador de estados trifásico a convergência não ocorreu, certamente devido à natureza da modelagem desacoplada rápida.

Estes resultados eram esperados, dadas as características do método desacoplado rápido adotado, e parte do objetivo desse trabalho, que consiste em oferecer subsídios para a continuidade dos estudos e desenvolvimento de estimadores de estados trifásicos do grupo de pesquisa.

É verificado que apesar dos dados de entrada do estimador de ensaio trifásico desacoplado serem coerentes e corretos, os resultados obtidos para o sistema de distribuição não estão dentro de margens de erro desejado. Isso pode ser justificado pelo uso do modelo desacoplado, que não é o mais apropriado para sistemas de distribuição. Esse é um indicativo de que estudos adicionais que podem envolver o uso de CPU também na ferramenta de estimação de estados trifásica devem ser realizados.

Percebe-se que o estimador de estado trifásico tem um funcionamento pleno quando aplicado a sistemas de transmissão, porém futuras implementações de ferramentas que permitem o processamento para relações x/r críticas, como o CPU, são necessárias para que sua utilização nos sistemas de distribuição seja plena. Um estimador trifásico aplicado sem nenhuma simplificação ao longo do processo, como as utilizadas pelo método desacoplado rápido, não trariam os erros observados, conforme comentado nos resultados dos casos 1. A escolha do modelo desacoplado rápido trás as vantagens de simplificação, devido à necessidade do alto custo computacional exigido pela própria modelagem trifásica, mas traz também outros desafios que podem ser trabalhados em trabalhos futuros para um melhor resultado na aplicação da distribuição.

Com relação ao simulador de medidas, esse se mostrou eficiente em simular medidas reais, tendo a flexibilidade de ser usado para sistemas de diferentes tamanhos e quantidades de barras, além de poder ser utilizado tanto na distribuição quanto na transmissão, devido a utilização de CPU no cálculo do fluxo de potência utilizado para disponibilizar os valores de medidas iniciais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um simulador de medidas trifásico para estudos de estimação de estados capaz de processar sistemas de transmissão e sistemas de distribuição emergentes, além de sua utilização em um protótipo inicial de estimador de estado trifásico.

A abordagem proposta para o simulador de medidas é apresentada em duas etapas: (1a) geração de valores verdadeiros das grandezas trifásicas medidas, e (2a) simulador de erros de medição.

A primeira etapa explora as características da normalização complexa por unidade, viabilizando um gerador de medidas exatas para sistemas de distribuição emergentes centrado em um FP3-DR. A eficiência e flexibilidade dos métodos desacoplados com relação a operações malhadas e com relação à modelagem de geração distribuída aliadas a abordagem trifásica, contemplam as necessidade de processamento tanto de redes de transmissão como de redes distribuição emergentes.

A segunda etapa da abordagem proposta incorpora aos valores exatos os erros de medição, disponibilizando assim um modelo de medição trifásico capaz de atender de maneira efetiva as necessidades dos estudos de EE.

Além do desenvolvimento do simulador de medidas trifásico, o presente trabalho apresenta um estimador de estado trifásico, que contempla os primeiros esforços para seu desenvolvimento. Inicialmente utiliza-se a teoria da sequência positiva para uma abordagem monofásica, que permite uma avaliação dos resultados obtidos com o simulador proposto. Num segundo momento, são apresentados os esforços despendidos no estudo da modelagem e implementação da abordagem trifásica do estimador de estados propriamente dito, que abre portas para o desenvolvimento de um estimador de estado trifásico mais efetivo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada neste trabalho pode contribuir com diferentes áreas de estudo do sistema de potência. Como sugestões mais diretas para continuidade do presente trabalho estão em especial :

- Expandir a utilização da CPU para o processo de estimação de estados trifásico;
- Um estudo mais aprofundado do estimador de estado trifásico visando incorporar impedâncias mútuas, outras abordagens de modelagem dos elementos trifásicos, utilização de técnicas que promovam maior robustez ao estimador.
- Implementação de outros estimadores de estados trifásicos com teorias diferentes, como a abordagem no nível de subestação.
- Incorporação de PMU e μ PMU como fontes de medidas para o estimador de estados

REFERENCIAS

- ABUR, A.; ÇELIC, M. K. *Implementation of the power system weighted least absolute value state estimator using an improved l_1 linear approximation algorithm*. **IEEE International Symposium on Circuits and Systems**. Vol. 2, nº 2 pp. 1281-1284, 1990.
- ABUR, Ali; GÓMEZ EXPÓSITO, Antonio. **Power system state estimation: theory and implementation**. New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2004. 327 p.
- ALBERINI, M. R. M. C. **Metodologia para Depuração off-line de parâmetros série e shunt de linhas de transmissão através de diversas amostras de medidas**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. pp 143- 153, 2010.
- ALLAM, M. F.; LAUGHTON, M. A. *A general algorithm for estimating power system variables and network parameters*. **IEEE Power Energy Society Summer Meeting Energy Resources Conference**, Anaheim, 1974.
- ALMEIDA, M. C.; ASADA, E. N.; GARCIA, A. V. *Effects of load imbalance and system asymmetry on three-phase state estimation*. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, pp. 1-6, 2006.
- AMERONGEN, R. A. M. *A general purpose version of the fast decoupled load flow*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 4, p.760-770, 1989.
- ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C.P.; HARKER, B.J. **Computer modeling of electrical power systems**. John Wiley, 1983.
- ARRILLAGA, J.; HARKER, B. J. *Fast-decoupled three-phase load flow*. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 125, p. 734-740, 1978.
- BARAN, M.E.; KELLEY, A.W. *A branch-current-based state estimation method for distribution systems*. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, p. 483-491, 1995.
- BREDA, J.; VIEIRA, J.; OLESKOVICZ, M. *Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the SVD technique*, **Power and Energy Society General Meeting (PESGM)**, p. 1, 2016.
- CHEN, Mo-Shing; DILLON, William E. *Power System Modeling*. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, p. 901-915, 1974
- DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO E. M.; LODDI, T. *Complex normalization to perform power flow analysis in emerging distribution systems*, **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)**, pp. 1–6, 2012.

ELGERD, O. I. **Electric Energy Systems Theory: An Introduction**. New York, McGraw-Hill, 1971.

FREUND, R. S. (2006). **Implantação da função de estimação de estado em um Sistema de Gerenciamento de Energia**. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal Fluminense. pp. 135-136.

GARCIA, A.; ABREU, P. *Fast Decoupled State Estimation And Bad Data Processing*, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, V. PAS-98, p. 1645-1652, 1979

GÖL, M.; ABUR, Ali. *A robust PMU based three-phase state estimator using modal decoupling*. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, p. 222-2299, 2014.

HANSEN, W. C.; DEBS, A. S. *Power system state estimation using three-phase models*. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, p. 818-824, 1995.

HORISBERGER, H.P; RICHARD, J.C.; ROSSIER, C. *A fast decoupled static state-estimator for electric power system*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 95, p. 208-215, 1976.

IRVING, M. R., OWEN, R. C. and Sterling M. J. H. *Power-system state estimation using linear programming*. **Proceedings of IEEE**. Vol. 125. nº 9, pp. 879-885, 1978.

KUHAR, U.; JURSE, J.; ALIC, K.; KANDUS, G. SVIGELJ, A. *A unified three-phase branch model for a distribution-system state estimation*, **PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**, p. 1, 2016.

LI, Q.; SUN, H.; WANG, J.; ZHANG, B.; WU, W.; GHO, Q. *Substation Three-phase Nonlinear State Estimation Based on KCL*. **IEEE/Power Energy Soc. Power Syst. Conf. Expo**, pp. 1–5, 2011,

LU, C. N; TENG, J. H.; LIU, W-H. E. *Distribution system state estimation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, p. 229-240, 1995.

LUI, W. H. E., WU, F. F. and Lun, S. M. *Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation*. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, Vol.7, nº 1, pp. 81-89, 1992.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems - A Generalized Approach**. 1999. 394 p.

MONTICELLI, A; GARCIA A. *Fast decoupled state estimators*. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, p. 556-564, 1990.

NANCHIAN, S.; MAJUMDAR, A.; PAL, B. *Three-Phase State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization*, **IEEE Transactions on Smart Grid**, V. 8, p. 1035-1045, 2017.

PORTELINHA, R. K.; TORTELLI, O. L. *Three Phase Fast Decoupled Power Flow for Emerging Distribution Systems*. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America**. pp. 13-18, 2015

SCHWEPPE, Fred C. *Power system static-state estimation, part III: implementation*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, p. 130-135, 1970.

SCHWEPPE, Fred C.; ROM, Douglas, B. *Power system static-state estimation, part II: approximate model*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, p.125-130, 1970

SCHWEPPE, Fred C.; WILDES, J. *Power system static-state estimation, part I: exact model*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, p.125-130, 1970.

STOTT, B.; ALSAÇ, O. *Fast decoupled load flow*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-93, p. 859-869, 1973.

TORTELLI, O. L., LOURENÇO, E. M., GARCIA, A. V.; PAL, B.C. *Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex pu Normalization*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 30, nº 3, pp. 1351-1358, 2015

WU, Felix F. *Power system state estimation: a survey*. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 12, p. 80-87, 1990

YANG, T.; SUN, H.; BOSE, A. *Transition to a Two-Level Linear State Estimator—Part I: Architecture*. **IEEE Transactions on Power Systems**, V. 26(1): p. 46-53, 2011

APÊNDICES

TABELA I. A - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 ÂNGULOS DE FASE PARA 30 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c
1	0,000	-120,000	120,000	0,000	-120,000	120,000	0,000%	0,000%	0,000%
2	-4,971	-124,761	114,890	-4,958	-124,749	114,903	0,254%	0,009%	-0,011%
3	-8,585	-128,568	111,103	-8,562	-128,545	111,128	0,272%	0,018%	-0,022%
4	-10,791	-130,696	109,217	-10,760	-130,665	109,248	0,285%	0,023%	-0,028%
5	-14,531	-134,294	105,399	-14,494	-134,258	105,435	0,255%	0,027%	-0,035%
6	-12,226	-132,051	107,794	-12,187	-132,013	107,831	0,320%	0,029%	-0,035%
7	-13,705	-133,482	106,315	-13,669	-133,446	106,351	0,266%	0,027%	-0,034%
8	-13,050	-132,830	107,014	-13,012	-132,793	107,050	0,293%	0,028%	-0,034%
9	-15,593	-135,425	104,440	-15,521	-135,353	104,511	0,465%	0,053%	-0,067%
10	-17,346	-137,166	102,675	-17,269	-137,090	102,751	0,448%	0,056%	-0,074%
11	-15,593	-135,425	104,440	-15,519	-135,352	104,512	0,475%	0,054%	-0,069%
12	-16,788	-136,618	103,234	-16,720	-136,549	103,303	0,408%	0,050%	-0,067%
13	-16,788	-136,618	103,234	-16,689	-136,518	103,334	0,592%	0,073%	-0,097%
14	-17,654	-137,494	102,339	-17,601	-137,441	102,392	0,301%	0,039%	-0,051%
15	-17,621	-137,485	102,355	-17,574	-137,440	102,400	0,268%	0,032%	-0,044%
16	-17,308	-137,130	102,713	-17,245	-137,069	102,775	0,367%	0,044%	-0,060%
17	-17,555	-137,373	102,465	-17,520	-137,342	102,497	0,197%	0,023%	-0,031%
18	-17,948	-137,792	102,047	-17,971	-137,817	102,021	-0,125%	-0,018%	0,025%
19	-18,238	-138,074	101,765	-18,275	-138,115	101,725	-0,203%	-0,029%	0,040%
20	-18,084	-137,912	101,927	-18,116	-137,946	101,892	-0,174%	-0,025%	0,034%
21	-17,813	-137,650	102,205	-17,796	-137,632	102,223	0,096%	0,013%	-0,018%
22	-17,796	-137,635	102,219	-17,782	-137,619	102,234	0,077%	0,012%	-0,015%
23	-18,008	-137,867	101,980	-17,984	-137,843	102,002	0,133%	0,018%	-0,022%
24	-18,153	-138,000	101,856	-18,104	-137,950	101,905	0,272%	0,036%	-0,048%
25	-17,642	-137,468	102,393	-17,671	-137,496	102,364	-0,163%	-0,020%	0,028%
26	-18,096	-137,918	101,939	-18,156	-137,976	101,881	-0,328%	-0,042%	0,057%
27	-17,052	-136,860	103,002	-17,070	-136,877	102,985	-0,104%	-0,013%	0,017%
28	-12,893	-132,683	107,146	-12,859	-132,650	107,179	0,261%	0,025%	-0,031%
29	-18,368	-138,173	101,679	-18,383	-138,188	101,664	-0,080%	-0,011%	0,014%
30	-19,323	-139,122	100,730	-19,336	-139,134	100,717	-0,068%	-0,009%	0,013%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. B RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 MÓDULO DE TENSÃO PARA 30 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência	Estimador de estado trifásico	Diferença percentual
-------	-------------------	-------------------------------	----------------------

	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c
1	1,060	1,060	1,060	1,061	1,061	1,061	-0,123%	-0,122%	-0,122%
2	1,043	1,043	1,043	1,044	1,044	1,044	-0,127%	-0,126%	-0,125%
3	1,016	1,016	1,016	1,017	1,017	1,017	-0,127%	-0,128%	-0,127%
4	1,007	1,007	1,006	1,008	1,008	1,007	-0,132%	-0,134%	-0,129%
5	1,010	1,010	1,010	1,011	1,011	1,011	-0,133%	-0,132%	-0,132%
6	1,009	1,008	1,008	1,010	1,009	1,009	-0,116%	-0,111%	-0,117%
7	1,001	1,001	1,001	1,003	1,003	1,002	-0,134%	-0,132%	-0,132%
8	1,010	1,010	1,010	1,011	1,011	1,011	-0,124%	-0,122%	-0,123%
9	1,031	1,030	1,030	1,030	1,029	1,029	0,091%	0,100%	0,088%
10	1,017	1,016	1,016	1,012	1,012	1,012	0,438%	0,435%	0,438%
11	1,082	1,082	1,082	1,082	1,082	1,082	-0,021%	-0,020%	-0,023%
12	1,026	1,025	1,025	1,026	1,026	1,026	-0,077%	-0,084%	-0,085%
13	1,071	1,071	1,071	1,072	1,072	1,072	-0,066%	-0,063%	-0,064%
14	1,008	1,008	1,008	1,009	1,009	1,009	-0,127%	-0,121%	-0,124%
15	1,002	1,002	1,001	1,002	1,002	1,002	-0,053%	-0,050%	-0,050%
16	1,014	1,014	1,014	1,014	1,013	1,013	0,045%	0,051%	0,044%
17	1,011	1,010	1,010	1,009	1,008	1,008	0,208%	0,205%	0,202%
18	0,983	0,982	0,982	0,984	0,983	0,983	-0,106%	-0,099%	-0,105%
19	0,985	0,985	0,985	0,986	0,986	0,986	-0,099%	-0,101%	-0,103%
20	0,992	0,992	0,992	0,993	0,992	0,992	-0,054%	-0,049%	-0,058%
21	1,003	1,003	1,003	1,001	1,001	1,000	0,232%	0,224%	0,231%
22	1,003	1,003	1,003	1,001	1,001	1,001	0,228%	0,226%	0,229%
23	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,038%	0,039%	0,038%
24	0,989	0,989	0,989	0,986	0,986	0,986	0,285%	0,286%	0,286%
25	0,983	0,983	0,984	0,983	0,983	0,984	-0,001%	-0,004%	0,006%
26	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	-0,039%	-0,039%	-0,040%
27	0,989	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	-0,077%	-0,072%	-0,074%
28	1,006	1,005	1,006	1,007	1,006	1,007	-0,120%	-0,126%	-0,120%
29	0,968	0,968	0,969	0,969	0,969	0,969	-0,062%	-0,063%	-0,059%
30	0,956	0,956	0,957	0,957	0,957	0,957	-0,064%	-0,063%	-0,064%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. C - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 ÂNGULOS DE FASE PARA 30 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c
1	0	-120	120	0	-120	120	0,000%	0,000%	0,000%
2	-5,758	-124,871	114,792	-5,68829	-124,833	114,8008	1,225%	0,031%	-0,008%
3	-9,022	-128,695	111,054	-8,869	-128,585	111,1221	1,725%	0,086%	-0,061%

4	-11,165	-130,448	108,968	-10,987	-130,326	109,0287	1,620%	0,094%	-0,056%
5	-14,859	-134,293	105,363	-14,7002	-134,165	105,379	1,080%	0,095%	-0,015%
6	-12,813	-132,014	107,895	-12,6428	-131,883	107,9603	1,346%	0,099%	-0,060%
7	-14,137	-133,452	106,347	-13,9758	-133,317	106,3714	1,153%	0,101%	-0,023%
8	-13,616	-132,775	107,265	-13,4542	-132,631	107,3436	1,202%	0,108%	-0,073%
9	-16,134	-135,292	104,399	-15,8879	-135,141	104,5314	1,549%	0,112%	-0,127%
10	-17,962	-137,032	102,715	-17,6925	-136,88	102,8262	1,523%	0,111%	-0,108%
11	-16,134	-135,292	104,399	-15,877	-135,148	104,562	1,619%	0,106%	-0,156%
12	-17,407	-136,448	103,152	-17,0514	-136,292	103,1968	2,085%	0,114%	-0,043%
13	-17,407	-136,448	103,152	-16,9956	-136,244	103,1972	2,421%	0,150%	-0,044%
14	-18,308	-137,294	102,291	-17,9363	-137,16	102,294	2,072%	0,098%	-0,003%
15	-18,313	-137,252	102,334	-17,9723	-137,133	102,3283	1,895%	0,087%	0,006%
16	-17,946	-136,971	102,679	-17,609	-136,795	102,7666	1,914%	0,128%	-0,085%
17	-18,192	-137,211	102,481	-17,9296	-137,102	102,5585	1,464%	0,079%	-0,076%
18	-18,559	-137,586	102,067	-18,4053	-137,614	101,9861	0,835%	-0,021%	0,079%
19	-18,835	-137,894	101,814	-18,7164	-137,953	101,7179	0,634%	-0,043%	0,095%
20	-18,705	-137,712	101,985	-18,5764	-137,757	101,901	0,692%	-0,032%	0,082%
21	-18,445	-137,517	102,303	-18,2303	-137,415	102,3616	1,178%	0,074%	-0,057%
22	-18,433	-137,496	102,312	-18,2112	-137,395	102,3652	1,218%	0,074%	-0,052%
23	-18,678	-137,662	101,993	-18,3277	-137,537	101,9472	1,911%	0,091%	0,045%
24	-18,791	-137,835	101,92	-18,4705	-137,674	101,9258	1,735%	0,117%	-0,006%
25	-18,278	-137,362	102,495	-18,0741	-137,293	102,3973	1,128%	0,051%	0,095%
26	-18,726	-137,802	102,041	-18,6433	-137,728	101,7755	0,444%	0,054%	0,261%
27	-17,685	-136,814	103,141	-17,4718	-136,726	103,1088	1,220%	0,064%	0,031%
28	-13,445	-132,695	107,308	-13,275	-132,561	107,3658	1,281%	0,101%	-0,054%
29	-18,989	-138,148	101,801	-18,6283	-138,06	101,7653	1,936%	0,064%	0,035%
30	-19,935	-139,089	100,873	-19,6484	-138,938	100,824	1,459%	0,109%	0,049%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. D - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 MÓDULO DE TENSÃO PARA 30 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c
1	1,06	1,06	1,06	1,065134	1,061329	1,061739	-0,482%	-0,125%	-0,164%
2	1,043	1,043	1,043	1,047851	1,044434	1,044736	-0,463%	-0,137%	-0,166%
3	1,0164	1,0186	1,0115	1,021047	1,019789	1,01394	-0,455%	-0,117%	-0,241%
4	1,0069	1,0072	1,0092	1,011482	1,008445	1,011516	-0,453%	-0,123%	-0,229%
5	1,01	1,01	1,01	1,014726	1,011639	1,012117	-0,466%	-0,162%	-0,209%
6	1,0081	1,0087	1,0087	1,012313	1,009844	1,0109	-0,416%	-0,113%	-0,218%
7	1,0013	1,0013	1,001	1,005474	1,002689	1,003325	-0,415%	-0,139%	-0,232%

8	1,01	1,01	1,01	1,014143	1,01138	1,01233	-0,409%	-0,136%	-0,230%
9	1,0307	1,0312	1,0309	1,033963	1,030455	1,030175	-0,316%	0,072%	0,070%
10	1,0162	1,0174	1,0176	1,015665	1,012974	1,012969	0,053%	0,437%	0,457%
11	1,082	1,082	1,082	1,087353	1,08453	1,083594	-0,492%	-0,233%	-0,147%
12	1,025	1,0268	1,0251	1,029107	1,027481	1,024932	-0,399%	-0,066%	0,016%
13	1,071	1,071	1,071	1,076346	1,071104	1,068516	-0,497%	-0,010%	0,232%
14	1,008	1,0092	1,0073	1,012117	1,010787	1,008286	-0,407%	-0,157%	-0,098%
15	1,0023	1,003	1,0017	1,006025	1,00376	1,002509	-0,370%	-0,076%	-0,081%
16	1,0136	1,0152	1,0144	1,015777	1,013054	1,011692	-0,214%	0,212%	0,268%
17	1,0104	1,0114	1,0114	1,011705	1,008693	1,008193	-0,129%	0,268%	0,318%
18	0,9838	0,9841	0,9833	0,990966	0,987434	0,985816	-0,723%	-0,338%	-0,255%
19	0,9858	0,9865	0,9859	0,992985	0,990283	0,988561	-0,724%	-0,382%	-0,269%
20	0,9927	0,9936	0,9925	0,999133	0,996662	0,99446	-0,644%	-0,307%	-0,197%
21	1,002	1,0037	1,0051	1,00356	1,001	1,002381	-0,155%	0,270%	0,271%
22	1,0026	1,004	1,0051	1,003927	1,001277	1,002704	-0,132%	0,272%	0,239%
23	0,9926	0,9933	0,9933	0,99334	0,991738	0,995336	-0,075%	0,158%	-0,205%
24	0,9885	0,9893	0,99	0,987857	0,985573	0,989541	0,065%	0,378%	0,046%
25	0,9833	0,9843	0,9843	0,98482	0,984303	0,988197	-0,154%	0,000%	-0,394%
26	0,9649	0,9658	0,9661	0,969397	0,966125	0,973828	-0,464%	-0,034%	-0,794%
27	0,989	0,9902	0,9897	0,989252	0,990167	0,993045	-0,025%	0,003%	-0,337%
28	1,0058	1,0075	1,0052	1,009765	1,008638	1,007559	-0,393%	-0,113%	-0,234%
29	0,9681	0,97	0,9689	0,964513	0,96903	0,971873	0,372%	0,100%	-0,306%
30	0,9564	0,958	0,9569	0,955784	0,954186	0,960684	0,064%	0,400%	-0,394%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. E - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 ÂNGULOS DE FASE PARA 69 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c
1	0	-120	120	0	-120	120	0,000%	0,000%	0,000%
2	-0,001	-120,001	119,999	-0,001	-120,001	119,9988	0,000%	0,000%	0,000%
3	-0,002	-120,002	119,998	-0,002	-120,002	119,9973	0,000%	0,000%	0,001%
4	-0,006	-120,005	119,995	0,00601	-120,007	119,9943	-0,166%	-0,001%	0,001%
5	-0,018	-120,018	119,982	-0,0181	-120,019	119,9818	-0,552%	-0,001%	0,000%
6	0,049	-119,949	120,05	0,0486	-119,95	120,049	0,823%	-0,001%	0,001%
7	0,12	-119,876	120,121	0,1194	-119,878	120,1205	0,503%	-0,001%	0,000%
8	0,137	-119,859	120,138	0,1368	-119,86	120,1373	0,146%	-0,001%	0,001%
9	0,146	-119,85	120,146	0,1455	-119,852	120,146	0,344%	-0,001%	0,000%
10	0,229	-119,764	120,23	0,228	-119,765	120,2297	0,439%	-0,001%	0,000%
11	0,247	-119,745	120,249	0,2463	-119,746	120,2483	0,284%	-0,001%	0,001%

12	0,299	-119,691	120,3	0,2979	-119,692	120,3	0,369%	-0,001%	0,000%
13	0,344	-119,644	120,346	0,3438	-119,645	120,3454	0,058%	-0,001%	0,000%
14	0,39	-119,597	120,391	0,3895	-119,598	120,3902	0,128%	-0,001%	0,001%
15	0,436	-119,55	120,435	0,4354	-119,551	120,4347	0,138%	-0,001%	0,000%
16	0,445	-119,542	120,444	0,4439	-119,543	120,4431	0,248%	-0,001%	0,001%
17	0,459	-119,527	120,457	0,458	-119,528	120,4568	0,218%	-0,001%	0,000%
18	0,459	-119,527	120,457	0,4581	-119,528	120,4569	0,196%	-0,001%	0,000%
19	0,467	-119,519	120,465	0,4665	-119,52	120,4649	0,107%	-0,001%	0,000%
20	0,473	-119,513	120,471	0,472	-119,514	120,47	0,212%	-0,001%	0,001%
21	0,481	-119,504	120,479	0,4807	-119,506	120,4782	0,062%	-0,001%	0,001%
22	0,482	-119,504	120,479	0,4809	-119,506	120,4783	0,229%	-0,001%	0,001%
23	0,483	-119,503	120,48	0,4822	-119,504	120,4796	0,166%	-0,001%	0,000%
24	0,486	-119,5	120,483	0,4851	-119,501	120,4823	0,186%	-0,001%	0,001%
25	0,489	-119,497	120,486	0,4885	-119,498	120,4856	0,102%	-0,001%	0,000%
26	0,491	-119,496	120,487	0,4899	-119,497	120,4869	0,225%	-0,001%	0,000%
27	0,491	-119,495	120,488	0,4903	-119,497	120,4873	0,143%	-0,001%	0,001%
28	-0,002	-120,002	119,997	-0,0021	-120,002	119,997	-4,762%	0,000%	0,000%
29	-0,005	-120,005	119,995	-0,0051	-120,006	119,9939	-1,961%	0,000%	0,001%
30	-0,003	-120,003	119,997	-0,0029	-120,004	119,9962	3,448%	-0,001%	0,001%
31	-0,002	-120,003	119,998	-0,0021	-120,003	119,9967	-4,762%	0,000%	0,001%
32	-0,001	-120,001	120	-0,0014	-120,002	119,9988	-28,571%	-0,001%	0,001%
33	0,004	-119,998	120,005	0,0037	-119,998	120,0037	8,108%	0,000%	0,001%
34	0,01	-119,993	120,01	0,0092	-119,994	120,0092	8,696%	-0,001%	0,001%
35	0,011	-119,993	120,011	0,0097	-119,994	120,0105	13,402%	-0,001%	0,000%
36	-0,003	-120,002	119,997	-0,0031	-120,003	119,9967	-3,226%	-0,001%	0,000%
37	-0,009	-120,009	119,991	-0,0107	-120,01	119,9894	-15,888%	-0,001%	0,001%
38	-0,012	-120,011	119,988	-0,0133	-120,012	119,987	-9,774%	-0,001%	0,001%
39	-0,013	-120,012	119,988	-0,014	-120,013	119,9862	-7,143%	-0,001%	0,002%
40	-0,013	-120,012	119,987	-0,014	-120,013	119,9862	-7,143%	-0,001%	0,001%
41	-0,025	-120,021	119,976	-0,0257	-120,023	119,9752	-2,724%	-0,001%	0,001%
42	-0,029	-120,026	119,972	-0,0306	-120,027	119,9707	-5,229%	-0,001%	0,001%
43	-0,03	-120,026	119,971	-0,0312	-120,028	119,9701	-3,846%	-0,001%	0,001%
44	-0,03	-120,027	119,971	-0,0314	-120,028	119,9699	-4,459%	0,000%	0,001%
45	-0,032	-120,028	119,969	-0,0333	-120,029	119,9681	-3,904%	-0,001%	0,001%
46	-0,032	-120,028	119,969	-0,0333	-120,029	119,9681	-3,904%	-0,001%	0,001%
47	-0,008	-120,007	119,993	-0,0084	-120,009	119,9922	-4,762%	-0,001%	0,001%
48	-0,052	-120,052	119,948	-0,0552	-120,056	119,9448	-5,797%	-0,003%	0,003%
49	-0,191	-120,191	119,809	-0,1921	-120,193	119,807	-0,573%	-0,001%	0,002%
50	-0,21	-120,211	119,789	-0,2122	-120,213	119,787	-1,037%	-0,001%	0,002%
51	0,138	-119,859	120,138	0,1371	-119,86	120,1375	0,656%	-0,001%	0,000%

52	0,138	-119,859	120,138	0,1374	-119,86	120,1378	0,437%	-0,001%	0,000%
53	0,168	-119,829	120,169	0,1673	-119,83	120,1684	0,418%	-0,001%	0,000%
54	0,193	-119,803	120,195	0,1926	-119,804	120,1943	0,208%	-0,001%	0,001%
55	0,229	-119,768	120,231	0,2282	-119,769	120,2301	0,351%	-0,001%	0,001%
56	0,264	-119,733	120,266	0,2632	-119,734	120,2654	0,304%	-0,001%	0,000%
57	0,66	-119,337	120,665	0,6594	-119,338	120,6637	0,091%	-0,001%	0,001%
58	0,863	-119,135	120,868	0,8617	-119,137	120,867	0,151%	-0,001%	0,001%
59	0,944	-119,054	120,949	0,9428	-119,056	120,9483	0,127%	-0,002%	0,001%
60	1,048	-118,95	121,054	1,047	-118,952	121,0531	0,096%	-0,001%	0,001%
61	1,117	-118,88	121,124	1,1154	-118,883	121,1224	0,143%	-0,002%	0,001%
62	1,12	-118,878	121,127	1,1181	-118,88	121,1252	0,170%	-0,002%	0,001%
63	1,123	-118,874	121,13	1,1217	-118,876	121,1288	0,116%	-0,002%	0,001%
64	1,141	-118,855	121,148	1,1391	-118,858	121,1467	0,167%	-0,002%	0,001%
65	1,146	-118,85	121,154	1,1443	-118,853	121,1517	0,149%	-0,002%	0,002%
66	0,248	-119,744	120,25	0,2473	-119,745	120,2495	0,283%	-0,001%	0,000%
67	0,248	-119,744	120,25	0,2473	-119,745	120,2495	0,283%	-0,001%	0,000%
68	0,304	-119,684	120,306	0,3036	-119,686	120,3057	0,132%	-0,001%	0,000%
69	0,304	-119,684	120,306	0,3036	-119,686	120,3057	0,132%	-0,001%	0,000%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. F - RESULTADOS COMPLETOS CASO 1 MÓDULO DE TENSÃO PARA 69 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c
1	1	1	1	1,000023	1,000026	1,000024	0,000%	-0,256%	-0,236%
2	1	1	1	0,999989	0,999998	0,999989	0,001%	0,000%	0,001%
3	0,9999	0,9999	0,9999	0,999955	0,999964	0,999952	-0,005%	-0,006%	-0,005%
4	0,9998	0,9999	0,9998	0,999849	0,999859	0,999857	-0,005%	0,004%	-0,006%
5	0,999	0,999	0,999	0,999039	0,999043	0,99903	-0,004%	-0,004%	-0,003%
6	0,9901	0,9901	0,9901	0,99011	0,990136	0,99008	-0,001%	-0,004%	0,002%
7	0,9808	0,9809	0,9808	0,980831	0,98087	0,980777	-0,003%	0,003%	0,002%
8	0,9786	0,9787	0,9786	0,978615	0,978665	0,978568	-0,002%	0,004%	0,003%
9	0,9775	0,9775	0,9774	0,977486	0,977534	0,977432	0,001%	-0,004%	-0,003%
10	0,9725	0,9725	0,9724	0,972494	0,972548	0,972397	0,001%	-0,005%	0,000%
11	0,9714	0,9715	0,9713	0,971396	0,971453	0,971287	0,000%	0,005%	0,001%
12	0,9682	0,9683	0,9681	0,968245	0,968304	0,968095	-0,005%	0,000%	0,000%
13	0,9653	0,9654	0,9651	0,965326	0,965401	0,965124	-0,003%	0,000%	-0,003%
14	0,9624	0,9625	0,9622	0,962435	0,962518	0,962183	-0,004%	-0,002%	0,002%
15	0,9596	0,9597	0,9593	0,959569	0,959666	0,959272	0,003%	0,004%	0,003%
16	0,959	0,9591	0,9587	0,959037	0,959135	0,958731	-0,004%	-0,004%	-0,003%

17	0,9582	0,9583	0,9578	0,958162	0,958258	0,957837	0,004%	0,004%	-0,004%
18	0,9582	0,9582	0,9578	0,958153	0,958249	0,957827	0,005%	-0,005%	-0,003%
19	0,9577	0,9578	0,9574	0,957686	0,957786	0,957354	0,002%	0,002%	0,005%
20	0,9574	0,9575	0,957	0,957385	0,957488	0,95705	0,002%	0,001%	-0,005%
21	0,9569	0,957	0,9566	0,956905	0,957008	0,956563	-0,001%	-0,001%	0,004%
22	0,9569	0,957	0,9566	0,956898	0,957001	0,956556	0,000%	0,000%	0,005%
23	0,9568	0,9569	0,9565	0,956825	0,956928	0,956482	-0,003%	-0,003%	0,002%
24	0,9567	0,9568	0,9563	0,956667	0,956769	0,956321	0,003%	0,003%	-0,002%
25	0,9565	0,9566	0,9562	0,956501	0,956597	0,956155	0,000%	0,000%	0,005%
26	0,9564	0,9565	0,9561	0,956433	0,956526	0,956087	-0,003%	-0,003%	0,001%
27	0,9564	0,9565	0,9561	0,956414	0,956507	0,956068	-0,001%	-0,001%	0,003%
28	0,9999	0,9999	0,9999	0,999946	0,999956	0,999943	-0,005%	-0,006%	-0,004%
29	0,9999	0,9999	0,9999	0,999858	0,999873	0,999854	0,004%	0,003%	0,005%
30	0,9997	0,9998	0,9997	0,999735	0,999755	0,999731	-0,004%	0,004%	-0,003%
31	0,9997	0,9997	0,9997	0,999713	0,999734	0,99971	-0,001%	-0,003%	-0,001%
32	0,9996	0,9996	0,9996	0,999605	0,999632	0,999602	-0,001%	-0,003%	0,000%
33	0,9993	0,9994	0,9993	0,999346	0,999386	0,999342	-0,005%	0,001%	-0,004%
34	0,999	0,9991	0,999	0,999002	0,99908	0,999001	0,000%	0,002%	0,000%
35	0,9989	0,999	0,9989	0,998921	0,99903	0,998934	-0,002%	-0,003%	-0,003%
36	0,9999	0,9999	0,9999	0,999939	0,999948	0,999936	-0,004%	-0,005%	-0,004%
37	0,9997	0,9998	0,9998	0,99974	0,999753	0,999745	-0,004%	0,005%	0,006%
38	0,9996	0,9996	0,9996	0,999576	0,999596	0,999589	0,002%	0,000%	0,001%
39	0,9995	0,9996	0,9996	0,999528	0,99955	0,999544	-0,003%	0,005%	0,006%
40	0,9995	0,9996	0,9995	0,999526	0,999548	0,999541	-0,003%	0,005%	-0,004%
41	0,9988	0,9989	0,9989	0,998796	0,998858	0,998848	0,000%	0,004%	0,005%
42	0,9985	0,9986	0,9986	0,998494	0,998569	0,998555	0,001%	0,003%	0,005%
43	0,9985	0,9985	0,9985	0,998454	0,99853	0,998516	0,005%	-0,003%	-0,002%
44	0,9984	0,9985	0,9985	0,998446	0,998522	0,998508	-0,005%	-0,002%	-0,001%
45	0,9983	0,9984	0,9984	0,998346	0,998426	0,998409	-0,005%	-0,003%	-0,001%
46	0,9983	0,9984	0,9984	0,998345	0,998425	0,998409	-0,005%	-0,003%	-0,001%
47	0,9998	0,9998	0,9998	0,999793	0,999805	0,999803	0,001%	-0,001%	0,000%
48	0,9985	0,9986	0,9985	0,998489	0,998503	0,998493	0,001%	0,010%	0,001%
49	0,9947	0,9947	0,9947	0,994682	0,994702	0,994683	0,002%	0,000%	0,002%
50	0,9942	0,9942	0,9942	0,994131	0,994151	0,994132	0,007%	0,005%	0,007%
51	0,9786	0,9786	0,9785	0,978579	0,97863	0,978534	0,002%	-0,003%	-0,003%
52	0,9786	0,9786	0,9785	0,978568	0,97862	0,978528	0,003%	-0,002%	-0,003%
53	0,9747	0,9748	0,9746	0,974704	0,974751	0,974647	0,000%	0,005%	-0,005%
54	0,9715	0,9715	0,9714	0,971469	0,971512	0,971402	0,003%	-0,001%	0,000%
55	0,967	0,967	0,9669	0,967003	0,967047	0,966927	0,000%	-0,005%	-0,003%
56	0,9626	0,9627	0,9626	0,96264	0,962684	0,962555	-0,004%	0,002%	0,005%

57	0,9402	0,9403	0,9401	0,940198	0,940261	0,940072	0,000%	0,004%	0,003%
58	0,9291	0,9292	0,929	0,92915	0,92922	0,929003	-0,005%	-0,002%	0,000%
59	0,9249	0,9249	0,9247	0,924873	0,924946	0,924717	0,003%	-0,005%	-0,002%
60	0,9199	0,9199	0,9197	0,919846	0,919931	0,919687	0,006%	-0,003%	0,001%
61	0,9125	0,9126	0,9123	0,912463	0,912557	0,912288	0,004%	0,005%	0,001%
62	0,9122	0,9123	0,912	0,912177	0,91227	0,911997	0,003%	0,003%	0,000%
63	0,9118	0,9119	0,9116	0,911792	0,911885	0,911607	0,001%	0,002%	-0,001%
64	0,9099	0,91	0,9097	0,909902	0,909995	0,909696	0,000%	0,001%	0,000%
65	0,9093	0,9094	0,9091	0,909342	0,909436	0,909125	-0,005%	-0,004%	-0,003%
66	0,9713	0,9714	0,9712	0,97134	0,971397	0,971229	-0,004%	0,000%	-0,003%
67	0,9713	0,9714	0,9712	0,971339	0,971397	0,971229	-0,004%	0,000%	-0,003%
68	0,9679	0,968	0,9678	0,967925	0,967972	0,967762	-0,003%	0,003%	0,004%
69	0,9679	0,968	0,9678	0,967924	0,967971	0,967761	-0,002%	0,003%	0,004%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. G - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 ÂNGULOS DE FASE PARA 69 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c	θ^a	θ^b	θ^c
1	0	-120	120	0	-120	120	0,000%	0,000%	0,000%
2	-0,001	-120,001	119,999	-0,00086	-120,001	119,9988	16,072%	0,000%	0,000%
3	-0,002	-120,002	119,998	-0,00172	-120,002	119,9973	16,265%	0,000%	0,001%
4	-0,006	-120,005	119,995	-0,00432	-120,006	119,9942	38,761%	-0,001%	0,001%
5	-0,018	-120,018	119,982	-0,01862	-120,018	119,9822	-3,341%	0,000%	0,000%
6	0,049	-119,949	120,05	0,068324	-119,934	120,0565	-28,283%	0,013%	-0,005%
7	0,12	-119,876	120,121	0,143762	-119,869	120,141	-16,529%	0,006%	-0,017%
8	0,137	-119,859	120,138	0,161006	-119,85	120,1524	-14,910%	0,007%	-0,012%
9	0,146	-119,85	120,146	0,167647	-119,842	120,1618	-12,912%	0,007%	-0,013%
10	0,229	-119,764	120,23	0,225572	-119,794	120,1588	1,520%	-0,025%	0,059%
11	0,247	-119,745	120,249	0,239836	-119,771	120,1688	2,987%	-0,021%	0,067%
12	0,299	-119,691	120,3	0,215862	-119,648	120,2639	38,515%	0,036%	0,030%
13	0,344	-119,644	120,346	0,270323	-119,656	120,398	27,255%	-0,010%	-0,043%
14	0,39	-119,597	120,391	0,357123	-119,615	120,5024	9,206%	-0,015%	-0,092%
15	0,436	-119,55	120,435	0,498097	-119,503	120,4189	-12,467%	0,039%	0,013%
16	0,445	-119,542	120,444	0,509493	-119,492	120,4171	-12,658%	0,042%	0,022%
17	0,459	-119,527	120,457	0,486755	-119,502	120,4174	-5,702%	0,021%	0,033%
18	0,459	-119,527	120,457	0,486757	-119,502	120,4177	-5,703%	0,021%	0,033%
19	0,467	-119,519	120,465	0,47761	-119,518	120,4498	-2,221%	0,001%	0,013%
20	0,473	-119,513	120,471	0,482112	-119,513	120,4677	-1,890%	0,000%	0,003%
21	0,481	-119,504	120,479	0,50923	-119,535	120,4922	-5,544%	-0,026%	-0,011%

22	0,482	-119,504	120,479	0,510222	-119,536	120,4926	-5,531%	-0,027%	-0,011%
23	0,483	-119,503	120,48	0,526346	-119,533	120,4881	-8,235%	-0,025%	-0,007%
24	0,486	-119,5	120,483	0,566293	-119,514	120,4882	-14,179%	-0,012%	-0,004%
25	0,489	-119,497	120,486	0,675158	-119,382	120,4592	-27,573%	0,096%	0,022%
26	0,491	-119,496	120,487	0,705064	-119,332	120,4469	-30,361%	0,137%	0,033%
27	0,491	-119,495	120,488	0,705078	-119,321	120,4466	-30,362%	0,146%	0,034%
28	-0,002	-120,002	119,997	-0,00162	-120,003	119,997	23,144%	-0,001%	0,000%
29	-0,005	-120,005	119,995	0,006558	-120,052	119,9862	-176,244%	-0,039%	0,007%
30	-0,003	-120,003	119,997	-0,01665	-119,99	120,0214	-81,980%	0,011%	-0,020%
31	-0,002	-120,003	119,998	-0,01589	-119,986	120,0216	-87,410%	0,014%	-0,020%
32	-0,001	-120,001	120	-0,00806	-119,967	120,025	-87,600%	0,028%	-0,021%
33	0,004	-119,998	120,005	0,002297	-119,881	119,973	74,107%	0,097%	0,027%
34	0,01	-119,993	120,01	-0,02243	-119,862	119,8636	-144,580%	0,110%	0,122%
35	0,011	-119,993	120,011	0,226782	-120,037	119,7616	-95,150%	-0,037%	0,208%
36	-0,003	-120,002	119,997	-0,00191	-120,003	119,998	57,022%	-0,001%	-0,001%
37	-0,009	-120,009	119,991	-0,01557	-120,012	120,0354	-42,189%	-0,002%	-0,037%
38	-0,012	-120,011	119,988	-0,01726	-120,015	120,0509	-30,480%	-0,004%	-0,052%
39	-0,013	-120,012	119,988	-0,01813	-120,015	120,0518	-28,297%	-0,002%	-0,053%
40	-0,013	-120,012	119,987	-0,01845	-120,015	120,0518	-29,535%	-0,002%	-0,054%
41	-0,025	-120,021	119,976	-0,15083	-120,169	120,003	-83,425%	-0,123%	-0,022%
42	-0,029	-120,026	119,972	-0,164	-120,21	119,9271	-82,317%	-0,153%	0,037%
43	-0,03	-120,026	119,971	-0,16551	-120,208	119,9238	-81,875%	-0,151%	0,039%
44	-0,03	-120,027	119,971	-0,16556	-120,208	119,9232	-81,880%	-0,150%	0,040%
45	-0,032	-120,028	119,969	-0,17017	-120,202	119,9152	-81,196%	-0,145%	0,045%
46	-0,032	-120,028	119,969	-0,17016	-120,202	119,9152	-81,194%	-0,145%	0,045%
47	-0,008	-120,007	119,993	-0,00531	-120,009	119,9918	50,712%	-0,002%	0,001%
48	-0,052	-120,052	119,948	-0,00691	-120,066	119,9233	652,067%	-0,012%	0,021%
49	-0,191	-120,191	119,809	0,053248	-120,302	119,7787	-458,697%	-0,092%	0,025%
50	-0,21	-120,211	119,789	0,055795	-120,365	119,751	-476,375%	-0,128%	0,032%
51	0,138	-119,859	120,138	0,164917	-119,85	120,1503	-16,321%	0,007%	-0,010%
52	0,138	-119,859	120,138	0,186949	-119,816	120,1074	-26,183%	0,036%	0,025%
53	0,168	-119,829	120,169	0,181152	-119,819	120,1851	-7,260%	0,008%	-0,013%
54	0,193	-119,803	120,195	0,19804	-119,786	120,2093	-2,545%	0,014%	-0,012%
55	0,229	-119,768	120,231	0,235997	-119,74	120,2254	-2,965%	0,024%	0,005%
56	0,264	-119,733	120,266	0,283963	-119,697	120,2483	-7,030%	0,030%	0,015%
57	0,66	-119,337	120,665	0,593989	-119,147	120,6891	11,113%	0,160%	-0,020%
58	0,863	-119,135	120,868	0,755363	-118,967	120,958	14,250%	0,141%	-0,074%
59	0,944	-119,054	120,949	0,838195	-118,882	121,0693	12,623%	0,145%	-0,099%
60	1,048	-118,95	121,054	0,940958	-118,747	121,1946	11,376%	0,171%	-0,116%
61	1,117	-118,88	121,124	1,015873	-118,656	121,2719	9,955%	0,189%	-0,122%

62	1,12	-118,878	121,127	1,014087	-118,647	121,2756	10,444%	0,195%	-0,123%
63	1,123	-118,874	121,13	1,014617	-118,637	121,2786	10,682%	0,200%	-0,123%
64	1,141	-118,855	121,148	1,028424	-118,625	121,2852	10,946%	0,194%	-0,113%
65	1,146	-118,85	121,154	1,016932	-118,728	121,2846	12,692%	0,102%	-0,108%
66	0,248	-119,744	120,25	0,255127	-119,773	120,1537	-2,793%	-0,025%	0,080%
67	0,248	-119,744	120,25	0,255215	-119,773	120,1535	-2,827%	-0,025%	0,080%
68	0,304	-119,684	120,306	0,188788	-119,561	120,2255	61,027%	0,103%	0,067%
69	0,304	-119,684	120,306	0,188596	-119,561	120,2255	61,191%	0,103%	0,067%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. H - RESULTADOS COMPLETOS CASO 2 MÓDULO DE TENSÃO PARA 69 BARRAS

BARRA	Fluxo de potência			Estimador de estado trifásico			Diferença percentual		
	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c	V^a	V^b	V^c
1	1	1	1	1,002	1,006096	1,000037	-0,200%	-0,606%	-0,004%
2	1	1	1	1,001975	1,006068	1,000001	-0,197%	-0,603%	0,000%
3	0,9999	0,9999	0,9999	1,00195	1,006033	0,999962	-0,205%	-0,610%	-0,006%
4	0,9998	0,9999	0,9998	1,001877	1,005922	0,999863	-0,207%	-0,599%	-0,006%
5	0,999	0,999	0,999	1,000986	1,005089	0,998973	-0,198%	-0,606%	0,003%
6	0,9901	0,9901	0,9901	0,990425	0,995717	0,988896	-0,033%	-0,564%	0,122%
7	0,9808	0,9809	0,9808	0,980407	0,986736	0,97901	0,040%	-0,591%	0,183%
8	0,9786	0,9787	0,9786	0,978195	0,984505	0,976849	0,041%	-0,590%	0,179%
9	0,9775	0,9775	0,9774	0,977084	0,983383	0,975752	0,043%	-0,598%	0,169%
10	0,9725	0,9725	0,9724	0,973925	0,978066	0,975311	-0,146%	-0,569%	-0,298%
11	0,9714	0,9715	0,9713	0,97346	0,97663	0,974134	-0,212%	-0,525%	-0,291%
12	0,9682	0,9683	0,9681	0,975918	0,969429	0,966534	-0,791%	-0,116%	0,162%
13	0,9653	0,9654	0,9651	0,974011	0,971428	0,958412	-0,894%	-0,621%	0,698%
14	0,9624	0,9625	0,9622	0,971071	0,968848	0,953589	-0,893%	-0,655%	0,903%
15	0,9596	0,9597	0,9593	0,960984	0,961831	0,959809	-0,144%	-0,222%	-0,053%
16	0,959	0,9591	0,9587	0,960555	0,961128	0,960469	-0,162%	-0,211%	-0,184%
17	0,9582	0,9583	0,9578	0,962281	0,960691	0,961191	-0,424%	-0,249%	-0,353%
18	0,9582	0,9582	0,9578	0,962287	0,960689	0,961186	-0,425%	-0,259%	-0,352%
19	0,9577	0,9578	0,9574	0,963316	0,961518	0,959506	-0,583%	-0,387%	-0,219%
20	0,9574	0,9575	0,957	0,963259	0,961826	0,957635	-0,608%	-0,450%	-0,066%
21	0,9569	0,957	0,9566	0,962418	0,963623	0,955369	-0,573%	-0,687%	0,129%
22	0,9569	0,957	0,9566	0,962388	0,963648	0,955344	-0,570%	-0,690%	0,131%
23	0,9568	0,9569	0,9565	0,961537	0,96368	0,955313	-0,493%	-0,704%	0,124%
24	0,9567	0,9568	0,9563	0,959116	0,963028	0,955008	-0,252%	-0,647%	0,135%
25	0,9565	0,9566	0,9562	0,950686	0,958585	0,957257	0,612%	-0,207%	-0,110%
26	0,9564	0,9565	0,9561	0,948238	0,955921	0,957394	0,861%	0,061%	-0,135%

27	0,9564	0,9565	0,9561	0,947816	0,955448	0,957578	0,906%	0,110%	-0,154%
28	0,9999	0,9999	0,9999	1,001956	1,006011	0,999943	-0,205%	-0,607%	-0,004%
29	0,9999	0,9999	0,9999	1,002128	1,004925	0,999672	-0,222%	-0,500%	0,023%
30	0,9997	0,9998	0,9997	1,002768	1,000378	0,996729	-0,306%	-0,058%	0,298%
31	0,9997	0,9997	0,9997	1,00264	1,000063	0,996573	-0,293%	-0,036%	0,314%
32	0,9996	0,9996	0,9996	1,001075	0,999223	0,995946	-0,147%	0,038%	0,367%
33	0,9993	0,9994	0,9993	1,000331	0,993368	0,998483	-0,103%	0,607%	0,082%
34	0,999	0,9991	0,999	1,00239	0,988897	1,002661	-0,338%	1,032%	-0,365%
35	0,9989	0,999	0,9989	0,987113	0,99998	1,005271	1,194%	-0,098%	-0,634%
36	0,9999	0,9999	0,9999	1,001932	1,006026	0,999981	-0,203%	-0,609%	-0,008%
37	0,9997	0,9998	0,9998	1,001499	1,00581	1,000785	-0,180%	-0,598%	-0,098%
38	0,9996	0,9996	0,9996	1,001193	1,005477	1,0014	-0,159%	-0,584%	-0,180%
39	0,9995	0,9996	0,9996	1,001122	1,005393	1,001394	-0,162%	-0,576%	-0,179%
40	0,9995	0,9996	0,9995	1,001113	1,005384	1,001391	-0,161%	-0,575%	-0,189%
41	0,9988	0,9989	0,9989	0,99265	0,995757	0,997911	0,620%	0,316%	0,099%
42	0,9985	0,9986	0,9986	0,992087	0,994048	0,993894	0,646%	0,458%	0,473%
43	0,9985	0,9985	0,9985	0,991978	0,993934	0,993568	0,657%	0,459%	0,496%
44	0,9984	0,9985	0,9985	0,991957	0,993929	0,993531	0,650%	0,460%	0,500%
45	0,9983	0,9984	0,9984	0,991136	0,993957	0,993117	0,723%	0,447%	0,532%
46	0,9983	0,9984	0,9984	0,991134	0,993957	0,993116	0,723%	0,447%	0,532%
47	0,9998	0,9998	0,9998	1,001853	1,005864	0,999815	-0,205%	-0,603%	-0,001%
48	0,9985	0,9986	0,9985	1,001945	1,004406	0,998205	-0,344%	-0,578%	0,030%
49	0,9947	0,9947	0,9947	1,003679	0,998475	0,995281	-0,895%	-0,378%	-0,058%
50	0,9942	0,9942	0,9942	1,003793	0,997098	0,994568	-0,956%	-0,291%	-0,037%
51	0,9786	0,9786	0,9785	0,97801	0,984349	0,977024	0,060%	-0,584%	0,151%
52	0,9786	0,9786	0,9785	0,977109	0,98241	0,979085	0,153%	-0,388%	-0,060%
53	0,9747	0,9748	0,9746	0,973916	0,980599	0,972909	0,080%	-0,591%	0,174%
54	0,9715	0,9715	0,9714	0,970728	0,977497	0,970295	0,080%	-0,613%	0,114%
55	0,967	0,967	0,9669	0,965753	0,972032	0,968075	0,129%	-0,518%	-0,121%
56	0,9626	0,9627	0,9626	0,960963	0,966328	0,96527	0,170%	-0,375%	-0,277%
57	0,9402	0,9403	0,9401	0,941913	0,934577	0,94394	-0,182%	0,612%	-0,407%
58	0,9291	0,9292	0,929	0,930842	0,924644	0,929128	-0,187%	0,493%	-0,014%
59	0,9249	0,9249	0,9247	0,926147	0,920048	0,923794	-0,135%	0,527%	0,098%
60	0,9199	0,9199	0,9197	0,920896	0,913127	0,918738	-0,108%	0,742%	0,105%
61	0,9125	0,9126	0,9123	0,912515	0,902997	0,91232	-0,002%	1,064%	-0,002%
62	0,9122	0,9123	0,912	0,91245	0,90256	0,912189	-0,027%	1,079%	-0,021%
63	0,9118	0,9119	0,9116	0,912799	0,902519	0,912512	-0,109%	1,039%	-0,100%
64	0,9099	0,91	0,9097	0,914575	0,905375	0,914593	-0,511%	0,511%	-0,535%
65	0,9093	0,9094	0,9091	0,91386	0,91589	0,911224	-0,499%	-0,709%	-0,233%
66	0,9713	0,9714	0,9712	0,973102	0,97692	0,97482	-0,185%	-0,565%	-0,371%

67	0,9713	0,9714	0,9712	0,973101	0,976924	0,974825	-0,185%	-0,565%	-0,372%
68	0,9679	0,968	0,9678	0,976778	0,965617	0,96966	-0,909%	0,247%	-0,192%
69	0,9679	0,968	0,9678	0,976776	0,965613	0,969663	-0,909%	0,247%	-0,192%

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. I - RESULTADOS COMPLETOS MEDIDAS SISTEMA 30 BARRAS

tipo	nº	Medidas Fluxo de Potência			Após Simulador de Medidas			$3\sigma_z - Z - Z_o ^{(1)}$		
		fase a	fase b	fase c	fase a	fase b	fase c	fase a	fase b	fase c
p_{km}	1	1,5843	1,5758	1,5462	1,5892	1,5914	1,5499	0,0312	0,0204	0,0323
p_{km}	2	1,0460	1,0469	1,0701	1,0255	1,0647	1,0446	0,0155	0,0183	0,0105
p_{km}	3	0,1168	0,1163	0,1176	0,1153	0,1138	0,1193	0,0025	0,0015	0,0022
p_{km}	4	0,9820	0,9804	1,0031	0,9779	0,9781	1,0209	0,0158	0,0177	0,0182
p_{km}	5	0,8906	0,8918	0,8609	0,9088	0,8883	0,8478	0,0018	0,0165	0,0070
p_{km}	6	0,7083	0,7263	0,7181	0,7115	0,7093	0,7237	0,0169	0,0030	0,0144
p_{km}	7	0,5743	0,5641	0,6140	0,5862	0,5690	0,6116	0,0081	0,0151	0,0176
p_{km}	8	-0,0816	-0,0865	-0,1146	-0,0817	-0,0855	-0,1144	0,0019	0,0010	0,0038
p_{km}	9	0,3127	0,3182	0,3469	0,3106	0,3201	0,3568	0,0079	0,0081	0,0001
p_{km}	10	0,2921	0,2988	0,3040	0,2979	0,2915	0,2953	0,0042	0,0027	0,0014
p_{km}	11	0,2925	0,2910	0,3028	0,2916	0,2898	0,2969	0,0091	0,0087	0,0040
p_{km}	12	0,1657	0,1637	0,1658	0,1684	0,1638	0,1644	0,0013	0,0039	0,0027
p_{km}	13	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0009	0,0003	-0,0019	0,0011	0,0017	0,0001
p_{km}	14	0,2925	0,2910	0,3028	0,2940	0,2918	0,3100	0,0086	0,0092	0,0028
p_{km}	15	0,4196	0,4253	0,4072	0,4129	0,4327	0,4106	0,0033	0,0026	0,0067
p_{km}	16	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0008	-0,0003	-0,0011	0,0012	0,0017	0,0009
p_{km}	17	-0,0770	-0,0753	-0,0743	-0,0773	-0,0768	-0,0723	0,0018	0,0005	0,0000
p_{km}	18	0,1688	0,1767	0,1638	0,1690	0,1802	0,1635	0,0038	0,0005	0,0037
p_{km}	19	-0,0606	-0,0601	-0,0560	-0,0610	-0,0616	-0,0569	0,0016	0,0004	0,0011
p_{km}	20	0,0150	0,0133	0,0123	0,0138	0,0134	0,0140	0,0008	0,0019	0,0003
p_{km}	21	0,0256	0,0251	0,0210	0,0247	0,0264	0,0199	0,0012	0,0006	0,0009
p_{km}	22	-0,0550	-0,0576	-0,0503	-0,0556	-0,0565	-0,0487	0,0015	0,0009	0,0004
p_{km}	23	0,0230	0,0256	0,0183	0,0242	0,0261	0,0187	0,0008	0,0015	0,0015
p_{km}	24	-0,0721	-0,0695	-0,0768	-0,0704	-0,0715	-0,0775	0,0004	0,0000	0,0013
p_{km}	25	0,0957	0,0931	0,1007	0,0952	0,0927	0,1003	0,0015	0,0016	0,0036
p_{km}	26	0,0646	0,0652	0,0693	0,0629	0,0667	0,0703	0,0002	0,0005	0,0010
p_{km}	27	0,1596	0,1565	0,1694	0,1563	0,1573	0,1670	0,0007	0,0032	0,0015
p_{km}	28	0,0803	0,0819	0,0712	0,0789	0,0803	0,0719	0,0007	0,0003	0,0012
p_{km}	29	-0,0168	-0,0197	-0,0069	-0,0181	-0,0213	-0,0068	0,0007	0,0004	0,0020
p_{km}	30	-0,0436	-0,0465	-0,0406	-0,0448	-0,0466	-0,0402	0,0008	0,0019	0,0016
p_{km}	31	0,0628	0,0616	0,0638	0,0619	0,0606	0,0626	0,0011	0,0011	0,0009
p_{km}	32	0,0116	0,0145	0,0085	0,0131	0,0129	0,0097	0,0004	0,0004	0,0009
p_{km}	33	-0,0133	-0,0117	-0,0154	-0,0133	-0,0129	-0,0156	0,0020	0,0008	0,0017
p_{km}	34	0,0355	0,0355	0,0355	0,0368	0,0359	0,0370	0,0006	0,0016	0,0004
p_{km}	35	-0,0489	-0,0473	-0,0510	-0,0483	-0,0486	-0,0499	0,0014	0,0007	0,0009
p_{km}	36	0,1822	0,1805	0,1844	0,1835	0,1839	0,1860	0,0027	0,0006	0,0024
p_{km}	37	0,0614	0,0618	0,0616	0,0600	0,0621	0,0635	0,0006	0,0017	0,0001
p_{km}	38	0,0716	0,0712	0,0715	0,0704	0,0700	0,0698	0,0008	0,0008	0,0003
p_{km}	39	0,0365	0,0369	0,0367	0,0382	0,0378	0,0373	0,0003	0,0010	0,0014
p_{km}	40	-0,0083	-0,0027	0,0034	-0,0091	-0,0027	0,0015	0,0012	0,0019	0,0001
p_{km}	41	0,1910	0,1833	0,1817	0,1932	0,1800	0,1852	0,0018	0,0007	0,0005
p_{mk}	1	-1,5327	-1,5515	-1,5136	-1,5681	-1,5462	-1,5226	0,0007	0,0307	0,0269
p_{mk}	2	-1,0060	-1,0044	-1,0271	-0,9840	-1,0318	-1,0362	0,0140	0,0086	0,0268
p_{mk}	3	-0,0995	-0,0987	-0,0982	-0,0992	-0,0976	-0,0995	0,0017	0,0009	0,0006
p_{mk}	4	-0,9704	-0,9667	-0,9990	-0,9874	-0,9761	-0,9942	0,0030	0,0106	0,0152

p_{mk}	5	-0,8605	-0,8555	-0,8274	-0,8789	-0,8374	-0,8303	0,0016	0,0019	0,0171
p_{mk}	6	-0,6843	-0,6953	-0,6907	-0,6805	-0,6784	-0,6858	0,0162	0,0031	0,0151
p_{mk}	7	-0,5698	-0,5598	-0,6104	-0,5787	-0,5437	-0,6161	0,0112	0,0039	0,0142
p_{mk}	8	0,0822	0,0874	0,1156	0,0832	0,0874	0,1169	0,0011	0,0020	0,0027
p_{mk}	9	-0,3102	-0,3154	-0,3436	-0,3123	-0,3157	-0,3530	0,0079	0,0097	0,0006
p_{mk}	10	-0,2917	-0,2974	-0,3034	-0,2916	-0,2940	-0,3087	0,0099	0,0066	0,0047
p_{mk}	11	-0,2925	-0,2910	-0,3028	-0,2927	-0,2829	-0,2953	0,0099	0,0018	0,0025
p_{mk}	12	-0,1657	-0,1637	-0,1658	-0,1649	-0,1623	-0,1624	0,0032	0,0025	0,0006
p_{mk}	13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0019	0,0009	0,0010	0,0001	0,0011
p_{mk}	14	-0,2925	-0,2910	-0,3028	-0,2859	-0,2958	-0,2946	0,0033	0,0052	0,0018
p_{mk}	15	-0,4196	-0,4253	-0,4072	-0,4206	-0,4165	-0,4137	0,0090	0,0012	0,0035
p_{mk}	16	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0003	0,0010	0,0020	0,0017
p_{mk}	17	0,0779	0,0761	0,0751	0,0767	0,0767	0,0758	0,0008	0,0015	0,0013
p_{mk}	18	-0,1667	-0,1740	-0,1615	-0,1653	-0,1745	-0,1615	0,0026	0,0035	0,0040
p_{mk}	19	0,0610	0,0605	0,0563	0,0624	0,0595	0,0553	0,0006	0,0011	0,0009
p_{mk}	20	-0,0150	-0,0132	-0,0122	-0,0143	-0,0143	-0,0106	0,0013	0,0009	0,0004
p_{mk}	21	-0,0255	-0,0250	-0,0209	-0,0256	-0,0241	-0,0215	0,0019	0,0011	0,0014
p_{mk}	22	0,0558	0,0584	0,0509	0,0560	0,0598	0,0527	0,0018	0,0005	0,0002
p_{mk}	23	-0,0229	-0,0255	-0,0182	-0,0240	-0,0262	-0,0163	0,0010	0,0014	0,0001
p_{mk}	24	0,0724	0,0698	0,0771	0,0725	0,0700	0,0777	0,0019	0,0018	0,0015
p_{mk}	25	-0,0944	-0,0918	-0,0991	-0,0959	-0,0912	-0,0973	0,0005	0,0015	0,0001
p_{mk}	26	-0,0645	-0,0650	-0,0691	-0,0633	-0,0634	-0,0710	0,0008	0,0004	0,0001
p_{mk}	27	-0,1582	-0,1553	-0,1681	-0,1610	-0,1571	-0,1676	0,0013	0,0022	0,0034
p_{mk}	28	-0,0796	-0,0813	-0,0706	-0,0789	-0,0805	-0,0703	0,0013	0,0013	0,0016
p_{mk}	29	0,0168	0,0197	0,0069	0,0149	0,0181	0,0057	0,0001	0,0004	0,0008
p_{mk}	30	0,0438	0,0468	0,0407	0,0430	0,0454	0,0398	0,0012	0,0006	0,0011
p_{mk}	31	-0,0622	-0,0609	-0,0631	-0,0636	-0,0621	-0,0628	0,0006	0,0007	0,0017
p_{mk}	32	-0,0115	-0,0145	-0,0085	-0,0126	-0,0158	-0,0072	0,0009	0,0006	0,0006
p_{mk}	33	0,0134	0,0118	0,0155	0,0140	0,0121	0,0158	0,0014	0,0017	0,0017
p_{mk}	34	-0,0350	-0,0350	-0,0350	-0,0348	-0,0337	-0,0349	0,0018	0,0007	0,0019
p_{mk}	35	0,0492	0,0475	0,0513	0,0488	0,0493	0,0512	0,0016	0,0002	0,0019
p_{mk}	36	-0,1822	-0,1805	-0,1844	-0,1789	-0,1799	-0,1827	0,0006	0,0034	0,0023
p_{mk}	37	-0,0605	-0,0609	-0,0607	-0,0592	-0,0629	-0,0609	0,0007	0,0000	0,0018
p_{mk}	38	-0,0699	-0,0695	-0,0697	-0,0692	-0,0680	-0,0700	0,0013	0,0005	0,0017
p_{mk}	39	-0,0361	-0,0365	-0,0363	-0,0355	-0,0372	-0,0373	0,0014	0,0014	0,0010
p_{mk}	40	0,0083	0,0027	-0,0034	0,0072	0,0033	-0,0038	0,0008	0,0014	0,0016
p_{mk}	41	-0,1906	-0,1832	-0,1810	-0,1870	-0,1853	-0,1796	0,0005	0,0019	0,0026
q_{km}	1	-0,2154	0,0484	-0,0477	-0,2094	0,0493	-0,0463	0,0040	0,0012	0,0006
q_{km}	2	0,0795	0,0453	0,1005	0,0808	0,0456	0,0966	0,0007	0,0017	0,0000
q_{km}	3	-0,1600	-0,1600	-0,1726	-0,1633	-0,1619	-0,1690	0,0007	0,0021	0,0004
q_{km}	4	-0,0512	-0,0781	-0,0336	-0,0494	-0,0788	-0,0349	0,0002	0,0014	0,0007
q_{km}	5	0,0351	-0,0004	0,0091	0,0368	-0,0005	0,0086	0,0003	0,0020	0,0015
q_{km}	6	0,0202	-0,0345	-0,0096	0,0215	-0,0363	-0,0098	0,0007	0,0002	0,0018
q_{km}	7	-0,1759	-0,1856	-0,1754	-0,1736	-0,1876	-0,1735	0,0017	0,0020	0,0021
q_{km}	8	0,1011	0,1041	0,1112	0,1020	0,1072	0,1149	0,0030	0,0009	0,0003
q_{km}	9	-0,0208	-0,0228	-0,0278	-0,0220	-0,0210	-0,0271	0,0008	0,0002	0,0013
q_{km}	10	-0,0712	-0,1437	-0,0878	-0,0705	-0,1447	-0,0884	0,0013	0,0030	0,0014
q_{km}	11	-0,1020	-0,1026	-0,0978	-0,0992	-0,0993	-0,0994	0,0013	0,0007	0,0004
q_{km}	12	-0,0072	-0,0088	-0,0085	-0,0065	-0,0088	-0,0089	0,0012	0,0020	0,0016
q_{km}	13	-0,2568	-0,2560	-0,2586	-0,2526	-0,2626	-0,2609	0,0059	0,0034	0,0077
q_{km}	14	0,1354	0,1343	0,1399	0,1345	0,1341	0,1418	0,0031	0,0038	0,0022
q_{km}	15	-0,0451	-0,0555	-0,0416	-0,0442	-0,0552	-0,0418	0,0011	0,0017	0,0017
q_{km}	16	0,3476	0,3555	0,3359	0,3527	0,3552	0,3313	0,0049	0,0097	0,0054
q_{km}	17	-0,0287	-0,0319	-0,0306	-0,0299	-0,0317	-0,0322	0,0008	0,0018	0,0004

q_{km}	18	0,1064	0,0992	0,1023	0,1060	0,0992	0,1019	0,0036	0,0020	0,0036
q_{km}	19	-0,0279	-0,0306	-0,0273	-0,0261	-0,0287	-0,0253	0,0002	0,0001	0,0001
q_{km}	20	0,0127	0,0159	0,0146	0,0123	0,0178	0,0153	0,0016	0,0001	0,0013
q_{km}	21	0,0099	0,0126	0,0093	0,0118	0,0119	0,0110	0,0001	0,0013	0,0002
q_{km}	22	-0,0616	-0,0595	-0,0609	-0,0622	-0,0594	-0,0618	0,0014	0,0019	0,0011
q_{km}	23	-0,0284	-0,0305	-0,0291	-0,0266	-0,0306	-0,0297	0,0002	0,0019	0,0014
q_{km}	24	-0,0626	-0,0647	-0,0632	-0,0632	-0,0643	-0,0629	0,0014	0,0016	0,0017
q_{km}	25	0,0731	0,0752	0,0740	0,0729	0,0760	0,0759	0,0018	0,0012	0,0000
q_{km}	26	0,0487	0,0461	0,0494	0,0500	0,0476	0,0481	0,0008	0,0004	0,0007
q_{km}	27	0,1027	0,1068	0,1130	0,1003	0,1077	0,1152	0,0015	0,0030	0,0018
q_{km}	28	0,0536	0,0490	0,0460	0,0545	0,0494	0,0456	0,0011	0,0016	0,0015
q_{km}	29	-0,0120	-0,0080	-0,0016	-0,0109	-0,0089	-0,0008	0,0008	0,0010	0,0012
q_{km}	30	-0,0255	-0,0237	-0,0244	-0,0263	-0,0224	-0,0248	0,0012	0,0007	0,0016
q_{km}	31	0,0402	0,0397	0,0434	0,0397	0,0407	0,0441	0,0016	0,0010	0,0013
q_{km}	32	0,0095	0,0077	0,0084	0,0076	0,0068	0,0091	0,0001	0,0011	0,0013
q_{km}	33	0,0236	0,0214	0,0258	0,0235	0,0223	0,0267	0,0019	0,0011	0,0011
q_{km}	34	0,0237	0,0237	0,0237	0,0220	0,0253	0,0233	0,0003	0,0004	0,0016
q_{km}	35	-0,0004	-0,0025	0,0018	-0,0017	-0,0008	0,0036	0,0007	0,0003	0,0002
q_{km}	36	0,0488	0,0504	0,0466	0,0505	0,0506	0,0458	0,0003	0,0018	0,0012
q_{km}	37	0,0162	0,0170	0,0169	0,0168	0,0160	0,0178	0,0015	0,0010	0,0011
q_{km}	38	0,0174	0,0167	0,0169	0,0161	0,0181	0,0159	0,0007	0,0006	0,0010
q_{km}	39	0,0055	0,0062	0,0061	0,0058	0,0058	0,0060	0,0018	0,0015	0,0019
q_{km}	40	0,0028	-0,0080	0,0017	0,0019	-0,0068	0,0001	0,0011	0,0008	0,0003
q_{km}	41	-0,0085	0,0038	-0,0099	-0,0074	0,0042	-0,0108	0,0010	0,0017	0,0011
q_{mk}	1	0,3095	0,0264	0,1270	0,3068	0,0262	0,1240	0,0073	0,0018	0,0009
q_{mk}	2	0,0392	0,0661	0,0216	0,0400	0,0646	0,0219	0,0012	0,0004	0,0017
q_{mk}	3	0,1265	0,1268	0,1397	0,1297	0,1284	0,1360	0,0008	0,0024	0,0004
q_{mk}	4	0,0785	0,0983	0,0613	0,0772	0,0992	0,0612	0,0006	0,0011	0,0019
q_{mk}	5	0,0598	0,0988	0,0849	0,0607	0,0982	0,0843	0,0011	0,0015	0,0014
q_{mk}	6	0,0262	0,0819	0,0541	0,0254	0,0808	0,0522	0,0012	0,0009	0,0001
q_{mk}	7	0,1834	0,1921	0,1776	0,1832	0,1898	0,1786	0,0038	0,0017	0,0031
q_{mk}	8	-0,1197	-0,1225	-0,1288	-0,1192	-0,1221	-0,1289	0,0034	0,0037	0,0039
q_{mk}	9	0,0107	0,0135	0,0198	0,0117	0,0142	0,0216	0,0010	0,0013	0,0002
q_{mk}	10	0,0662	0,1387	0,0821	0,0670	0,1365	0,0818	0,0012	0,0018	0,0018
q_{mk}	11	0,1214	0,1217	0,1187	0,1189	0,1209	0,1192	0,0015	0,0032	0,0034
q_{mk}	12	0,0222	0,0233	0,0236	0,0233	0,0248	0,0217	0,0009	0,0005	0,0001
q_{mk}	13	0,2695	0,2686	0,2714	0,2669	0,2723	0,2689	0,0074	0,0063	0,0075
q_{mk}	14	-0,1242	-0,1237	-0,1293	-0,1205	-0,1241	-0,1304	0,0003	0,0036	0,0029
q_{mk}	15	0,0921	0,1016	0,0839	0,0928	0,1023	0,0855	0,0013	0,0033	0,0004
q_{mk}	16	-0,3327	-0,3409	-0,3215	-0,3319	-0,3485	-0,3207	0,0093	0,0024	0,0092
q_{mk}	17	0,0304	0,0336	0,0323	0,0301	0,0336	0,0329	0,0017	0,0020	0,0014
q_{mk}	18	-0,1014	-0,0944	-0,0977	-0,1009	-0,0959	-0,0960	0,0035	0,0005	0,0003
q_{mk}	19	0,0288	0,0315	0,0280	0,0281	0,0315	0,0289	0,0013	0,0019	0,0011
q_{mk}	20	-0,0126	-0,0158	-0,0145	-0,0118	-0,0154	-0,0140	0,0012	0,0015	0,0014
q_{mk}	21	-0,0098	-0,0124	-0,0092	-0,0092	-0,0108	-0,0096	0,0014	0,0004	0,0015
q_{mk}	22	0,0630	0,0610	0,0623	0,0628	0,0626	0,0642	0,0018	0,0004	0,0001
q_{mk}	23	0,0286	0,0307	0,0292	0,0299	0,0319	0,0285	0,0007	0,0007	0,0013
q_{mk}	24	0,0632	0,0654	0,0639	0,0650	0,0654	0,0633	0,0002	0,0020	0,0014
q_{mk}	25	-0,0702	-0,0724	-0,0709	-0,0705	-0,0719	-0,0694	0,0016	0,0015	0,0005
q_{mk}	26	-0,0482	-0,0456	-0,0488	-0,0477	-0,0452	-0,0501	0,0015	0,0016	0,0008
q_{mk}	27	-0,1000	-0,1040	-0,1104	-0,0992	-0,1012	-0,1116	0,0012	0,0012	0,0028
q_{mk}	28	-0,0522	-0,0477	-0,0450	-0,0513	-0,0468	-0,0430	0,0011	0,0011	0,0000
q_{mk}	29	0,0120	0,0080	0,0016	0,0132	0,0078	0,0031	0,0008	0,0018	0,0005
q_{mk}	30	0,0260	0,0243	0,0249	0,0273	0,0250	0,0264	0,0007	0,0012	0,0005

q_{mk}	31	-0,0392	-0,0388	-0,0423	-0,0404	-0,0396	-0,0422	0,0008	0,0011	0,0019
q_{mk}	32	-0,0094	-0,0076	-0,0084	-0,0084	-0,0083	-0,0093	0,0010	0,0013	0,0011
q_{mk}	33	-0,0233	-0,0212	-0,0255	-0,0240	-0,0214	-0,0261	0,0014	0,0018	0,0014
q_{mk}	34	-0,0230	-0,0230	-0,0230	-0,0231	-0,0230	-0,0230	0,0020	0,0020	0,0020
q_{mk}	35	0,0009	0,0030	-0,0012	0,0028	0,0028	-0,0002	0,0001	0,0018	0,0010
q_{mk}	36	-0,0346	-0,0367	-0,0325	-0,0350	-0,0386	-0,0307	0,0016	0,0001	0,0001
q_{mk}	37	-0,0145	-0,0152	-0,0151	-0,0161	-0,0157	-0,0147	0,0005	0,0015	0,0016
q_{mk}	38	-0,0141	-0,0135	-0,0136	-0,0142	-0,0134	-0,0139	0,0020	0,0019	0,0017
q_{mk}	39	-0,0049	-0,0056	-0,0054	-0,0053	-0,0042	-0,0074	0,0015	0,0007	0,0001
q_{mk}	40	-0,0462	-0,0356	-0,0451	-0,0458	-0,0337	-0,0439	0,0016	0,0002	0,0008
q_{mk}	41	-0,0026	-0,0149	-0,0015	-0,0030	-0,0162	-0,0019	0,0016	0,0007	0,0015
p_k	1	2,6304	2,6228	2,6163	2,6178	2,5687	2,6217	0,0434	0,0019	0,0507
p_k	2	0,1830	0,1830	0,1830	0,1820	0,1838	0,1823	0,0030	0,0032	0,0033
p_k	3	-0,0240	-0,0240	-0,0240	-0,0240	-0,0228	-0,0253	0,0020	0,0008	0,0007
p_k	4	-0,0760	-0,0760	-0,0760	-0,0762	-0,0759	-0,0758	0,0019	0,0019	0,0018
p_k	5	-0,9420	-0,9420	-0,9420	-0,9309	-0,9297	-0,9574	0,0089	0,0077	0,0046
p_k	6	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0000	-0,0006	0,0018	0,0020	0,0014
p_k	7	-0,2280	-0,2280	-0,2280	-0,2328	-0,2181	-0,2375	0,0052	0,0001	0,0005
p_k	8	-0,3000	-0,3000	-0,3000	-0,3035	-0,2913	-0,2960	0,0065	0,0013	0,0060
p_k	9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,0004	-0,0001	0,0015	0,0016	0,0019
p_k	10	-0,0580	-0,0580	-0,0580	-0,0594	-0,0564	-0,0579	0,0006	0,0004	0,0019
p_k	11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	-0,0016	-0,0001	0,0009	0,0004	0,0019
p_k	12	-0,1120	-0,1120	-0,1120	-0,1106	-0,1148	-0,1095	0,0026	0,0012	0,0015
p_k	13	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0008	0,0018	-0,0003	0,0012	0,0002	0,0017
p_k	14	-0,0620	-0,0620	-0,0620	-0,0631	-0,0605	-0,0627	0,0009	0,0005	0,0013
p_k	15	-0,0820	-0,0820	-0,0820	-0,0806	-0,0807	-0,0835	0,0006	0,0007	0,0005
p_k	16	-0,0350	-0,0350	-0,0350	-0,0334	-0,0350	-0,0363	0,0004	0,0020	0,0007
p_k	17	-0,0900	-0,0900	-0,0900	-0,0882	-0,0897	-0,0891	0,0001	0,0017	0,0011
p_k	18	-0,0320	-0,0320	-0,0320	-0,0318	-0,0327	-0,0308	0,0018	0,0013	0,0008
p_k	19	-0,0950	-0,0950	-0,0950	-0,0966	-0,0959	-0,0941	0,0004	0,0011	0,0011
p_k	20	-0,0220	-0,0220	-0,0220	-0,0226	-0,0240	-0,0240	0,0014	0,0000	0,0000
p_k	21	-0,1750	-0,1750	-0,1750	-0,1777	-0,1747	-0,1725	0,0013	0,0037	0,0015
p_k	22	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0005	-0,0009	-0,0007	0,0016	0,0011	0,0013
p_k	23	-0,0320	-0,0320	-0,0320	-0,0339	-0,0332	-0,0321	0,0002	0,0008	0,0020
p_k	24	-0,0870	-0,0870	-0,0870	-0,0872	-0,0880	-0,0864	0,0018	0,0010	0,0014
p_k	25	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0011	-0,0013	-0,0004	0,0009	0,0007	0,0016
p_k	26	-0,0350	-0,0350	-0,0350	-0,0352	-0,0343	-0,0340	0,0018	0,0013	0,0010
p_k	27	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0016	0,0005	0,0018	0,0004	0,0015	0,0002
p_k	28	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0010	0,0007	0,0012	0,0010	0,0013	0,0008
p_k	29	-0,0240	-0,0240	-0,0240	-0,0246	-0,0256	-0,0234	0,0014	0,0004	0,0014
p_k	30	-0,1060	-0,1060	-0,1060	-0,1021	-0,1096	-0,1054	0,0001	0,0004	0,0034
q_k	1	-0,1359	0,0937	0,0529	-0,1335	0,0942	0,0530	0,0016	0,0015	0,0019
q_k	2	0,2049	-0,1686	-0,0461	0,1985	-0,1653	-0,0481	0,0036	0,0007	0,0001
q_k	3	-0,0120	-0,0120	-0,0120	-0,0121	-0,0125	-0,0132	0,0019	0,0015	0,0008
q_k	4	-0,0160	-0,0160	-0,0160	-0,0174	-0,0160	-0,0167	0,0006	0,0020	0,0013
q_k	5	0,1608	0,2028	0,1961	0,1586	0,2118	0,1941	0,0018	0,0011	0,0020
q_k	6	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0007	-0,0003	-0,0010	0,0013	0,0017	0,0011
q_k	7	-0,1090	-0,1090	-0,1090	-0,1130	-0,1077	-0,1055	0,0001	0,0027	0,0005
q_k	8	0,0691	0,1307	0,0838	0,0672	0,1331	0,0832	0,0002	0,0016	0,0014
q_k	9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	-0,0018	0,0000	0,0013	0,0002	0,0020
q_k	10	-0,0200	-0,0200	-0,0200	-0,0182	-0,0192	-0,0214	0,0002	0,0012	0,0006
q_k	11	0,2695	0,2686	0,2714	0,2679	0,2696	0,2712	0,0084	0,0090	0,0098
q_k	12	-0,0750	-0,0750	-0,0750	-0,0731	-0,0743	-0,0741	0,0001	0,0013	0,0011
q_k	13	0,3476	0,3555	0,3359	0,3496	0,3549	0,3307	0,0081	0,0093	0,0048

q_k	14	-0,0160	-0,0160	-0,0160	-0,0163	-0,0171	-0,0147	0,0017	0,0009	0,0007
q_k	15	-0,0250	-0,0250	-0,0250	-0,0233	-0,0245	-0,0254	0,0003	0,0015	0,0016
q_k	16	-0,0180	-0,0180	-0,0180	-0,0182	-0,0192	-0,0176	0,0018	0,0008	0,0016
q_k	17	-0,0580	-0,0580	-0,0580	-0,0581	-0,0587	-0,0597	0,0019	0,0013	0,0003
q_k	18	-0,0900	-0,0900	-0,0900	-0,0884	-0,0898	-0,0884	0,0004	0,0018	0,0004
q_k	19	-0,0340	-0,0340	-0,0340	-0,0349	-0,0357	-0,0346	0,0012	0,0003	0,0014
q_k	20	-0,0070	-0,0070	-0,0070	-0,0064	-0,0087	-0,0063	0,0014	0,0003	0,0013
q_k	21	-0,1120	-0,1120	-0,1120	-0,1086	-0,1128	-0,1112	0,0006	0,0032	0,0032
q_k	22	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	-0,0010	-0,0005	0,0013	0,0010	0,0015
q_k	23	-0,0160	-0,0160	-0,0160	-0,0169	-0,0150	-0,0156	0,0011	0,0010	0,0016
q_k	24	-0,0670	-0,0670	-0,0670	-0,0678	-0,0681	-0,0655	0,0012	0,0009	0,0005
q_k	25	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0005	0,0017	0,0007	0,0015	0,0003	0,0013
q_k	26	-0,0230	-0,0230	-0,0230	-0,0218	-0,0216	-0,0228	0,0008	0,0006	0,0018
q_k	27	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0007	-0,0017	0,0018	0,0014	0,0003
q_k	28	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	0,0002	-0,0007	0,0013	0,0018	0,0013
q_k	29	-0,0090	-0,0090	-0,0090	-0,0090	-0,0079	-0,0109	0,0020	0,0009	0,0001
q_k	30	-0,0190	-0,0190	-0,0190	-0,0184	-0,0208	-0,0192	0,0014	0,0003	0,0018
v	1	1,0600	1,0600	1,0600	1,0803	1,0636	1,0421	0,0017	0,0184	0,0041
v	2	1,0430	1,0430	1,0430	1,0519	1,0596	1,0409	0,0131	0,0054	0,0199
v	3	1,0164	1,0186	1,0115	1,0099	1,0075	1,0230	0,0155	0,0109	0,0105
v	4	1,0069	1,0072	1,0092	1,0010	1,0011	1,0278	0,0161	0,0159	0,0034
v	5	1,0100	1,0100	1,0100	1,0302	0,9986	1,0098	0,0018	0,0106	0,0218
v	6	1,0081	1,0087	1,0087	1,0132	0,9994	1,0131	0,0169	0,0127	0,0177
v	7	1,0013	1,0013	1,0010	0,9857	1,0094	1,0147	0,0064	0,0139	0,0083
v	8	1,0100	1,0100	1,0100	1,0133	1,0190	1,0116	0,0187	0,0130	0,0204
v	9	1,0307	1,0312	1,0309	1,0487	1,0186	1,0223	0,0040	0,0095	0,0133
v	10	1,0162	1,0174	1,0176	1,0217	1,0229	1,0006	0,0165	0,0165	0,0050
v	11	1,0820	1,0820	1,0820	1,1022	1,1007	1,0965	0,0018	0,0033	0,0075
v	12	1,0250	1,0268	1,0251	1,0084	1,0412	1,0237	0,0054	0,0077	0,0206
v	13	1,0710	1,0710	1,0710	1,0927	1,0615	1,0526	0,0003	0,0125	0,0036
v	14	1,0080	1,0092	1,0073	1,0120	1,0104	1,0073	0,0180	0,0208	0,0219
v	15	1,0023	1,0030	1,0017	0,9922	1,0113	1,0071	0,0119	0,0138	0,0166
v	16	1,0136	1,0152	1,0144	1,0211	0,9991	0,9942	0,0146	0,0059	0,0018
v	17	1,0104	1,0114	1,0114	0,9923	1,0070	0,9918	0,0040	0,0177	0,0024
v	18	0,9838	0,9841	0,9833	1,0038	0,9838	0,9849	0,0020	0,0217	0,0204
v	19	0,9858	0,9865	0,9859	1,0064	1,0014	1,0032	0,0013	0,0071	0,0047
v	20	0,9927	0,9936	0,9925	0,9975	1,0148	1,0002	0,0172	0,0007	0,0143
v	21	1,0020	1,0037	1,0051	1,0218	0,9854	1,0024	0,0022	0,0037	0,0193
v	22	1,0026	1,0040	1,0051	0,9884	1,0023	0,9935	0,0079	0,0203	0,0103
v	23	0,9926	0,9933	0,9933	0,9863	0,9883	1,0081	0,0157	0,0170	0,0072
v	24	0,9885	0,9893	0,9900	0,9852	0,9824	1,0105	0,0187	0,0150	0,0015
v	25	0,9833	0,9843	0,9843	0,9992	0,9950	0,9850	0,0061	0,0113	0,0213
v	26	0,9649	0,9658	0,9661	0,9724	0,9640	0,9797	0,0145	0,0202	0,0084
v	27	0,9890	0,9902	0,9897	0,9774	0,9921	0,9882	0,0105	0,0201	0,0205
v	28	1,0058	1,0075	1,0052	0,9934	0,9971	1,0040	0,0096	0,0116	0,0208
v	29	0,9681	0,9700	0,9689	0,9487	0,9734	0,9701	0,0026	0,0186	0,0208
v	30	0,9564	0,9580	0,9569	0,9636	0,9439	0,9626	0,0147	0,0078	0,0163

(1) Se este valor for positivo, significa que o erro é um ruído normal. Caso de negativo indica erro grosseiro ou erro extremo

Fonte: o autor (2017).

TABELA I. J - RESULTADOS COMPLETOS MEDIDAS SISTEMA 69 BARRAS

tipo	nº	Medidas Fluxo de Potência			Após Simulador de Medidas			$3\sigma_z - Z - Z_o ^{(1)}$		
		fase a	fase b	fase c	fase a	fase b	fase c	fase a	fase b	fase c
p_{km}	1	-0,00177	-0,00185	-0,00177	-0,00284	-0,00357	-0,00241	0,0009	0,0003	0,0014
p_{km}	2	-0,00177	-0,00185	-0,00177	-0,00090	-0,00254	-0,00322	0,0011	0,0013	0,0005
p_{km}	3	-0,00162	-0,00168	-0,00160	-0,00149	-0,00311	-0,00119	0,0019	0,0006	0,0016
p_{km}	4	-0,00105	-0,00114	-0,00106	-0,00080	-0,00248	-0,00250	0,0018	0,0007	0,0006
p_{km}	5	-0,00104	-0,00113	-0,00105	-0,00202	-0,00258	-0,00045	0,0010	0,0005	0,0014
p_{km}	6	-0,00106	-0,00116	-0,00108	-0,00165	0,00041	-0,00286	0,0014	0,0004	0,0002
p_{km}	7	-0,00106	-0,00117	-0,00110	0,00056	-0,00182	0,00041	0,0004	0,0013	0,0005
p_{km}	8	-0,00098	-0,00110	-0,00103	-0,00077	-0,00062	-0,00167	0,0018	0,0015	0,0014
p_{km}	9	-0,00020	-0,00033	-0,00022	-0,00083	0,00140	-0,00016	0,0014	0,0003	0,0019
p_{km}	10	-0,00022	-0,00033	-0,00023	0,00011	-0,00158	0,00150	0,0017	0,0007	0,0003
p_{km}	11	-0,00013	-0,00021	-0,00011	-0,00029	-0,00020	0,00143	0,0018	0,0020	0,0005
p_{km}	12	-0,00003	-0,00007	0,00000	-0,00078	0,00038	0,00007	0,0013	0,0015	0,0019
p_{km}	13	-0,00004	-0,00007	0,00001	-0,00114	-0,00024	-0,00148	0,0009	0,0018	0,0005
p_{km}	14	-0,00004	-0,00006	0,00000	0,00119	-0,00156	-0,00038	0,0008	0,0005	0,0016
p_{km}	15	-0,00005	-0,00006	0,00000	-0,00182	0,00147	-0,00098	0,0002	0,0005	0,0010
p_{km}	16	-0,00004	-0,00005	0,00000	0,00032	0,00034	-0,00058	0,0016	0,0016	0,0014
p_{km}	17	-0,00007	-0,00006	-0,00003	-0,00047	0,00154	-0,00142	0,0016	0,0004	0,0006
p_{km}	18	-0,00009	-0,00010	-0,00005	-0,00176	0,00039	-0,00048	0,0003	0,0015	0,0016
p_{km}	19	-0,00009	-0,00010	-0,00005	-0,00030	-0,00154	0,00128	0,0018	0,0006	0,0007
p_{km}	20	-0,00009	-0,00010	-0,00005	-0,00047	0,00007	0,00083	0,0016	0,0018	0,0011
p_{km}	21	-0,00003	-0,00004	0,00000	-0,00171	0,00173	-0,00020	0,0003	0,0002	0,0018
p_{km}	22	-0,00003	-0,00003	-0,00002	0,00106	-0,00063	0,00118	0,0009	0,0014	0,0008
p_{km}	23	-0,00003	-0,00003	-0,00002	-0,00101	-0,00150	0,00037	0,0010	0,0005	0,0016
p_{km}	24	-0,00003	-0,00001	-0,00002	0,00165	-0,00193	-0,00027	0,0003	0,0001	0,0018
p_{km}	25	-0,00003	-0,00001	-0,00002	0,00037	-0,00166	0,00091	0,0016	0,0003	0,0011
p_{km}	26	-0,00001	-0,00002	0,00000	0,00053	0,00054	-0,00141	0,0015	0,0014	0,0006
p_{km}	27	-0,00007	-0,00005	-0,00009	0,00063	0,00160	-0,00111	0,0013	0,0004	0,0010
p_{km}	28	-0,00006	-0,00003	-0,00007	-0,00063	-0,00009	-0,00077	0,0014	0,0019	0,0013
p_{km}	29	-0,00002	0,00000	-0,00004	0,00058	-0,00005	0,00049	0,0014	0,0020	0,0015
p_{km}	30	-0,00002	0,00000	-0,00004	0,00055	0,00166	0,00192	0,0014	0,0003	0,0000
p_{km}	31	-0,00002	0,00000	-0,00004	0,00105	-0,00193	-0,00108	0,0009	0,0001	0,0010
p_{km}	32	-0,00002	0,00000	-0,00004	0,00002	0,00007	0,00156	0,0020	0,0019	0,0004
p_{km}	33	-0,00002	0,00000	-0,00001	0,00025	0,00143	0,00044	0,0017	0,0006	0,0016
p_{km}	34	0,00001	0,00001	0,00000	-0,00117	-0,00057	0,00169	0,0008	0,0014	0,0003
p_{km}	35	-0,00007	-0,00012	-0,00007	-0,00069	0,00161	0,00028	0,0014	0,0003	0,0016
p_{km}	36	-0,00005	-0,00010	-0,00006	-0,00163	-0,00076	-0,00084	0,0004	0,0013	0,0012
p_{km}	37	-0,00004	-0,00007	-0,00004	-0,00095	0,00019	-0,00041	0,0011	0,0017	0,0016
p_{km}	38	-0,00004	-0,00007	-0,00004	0,00091	-0,00179	-0,00095	0,0010	0,0003	0,0011
p_{km}	39	-0,00002	-0,00006	-0,00004	0,00167	0,00061	-0,00114	0,0003	0,0013	0,0009
p_{km}	40	-0,00002	-0,00005	-0,00002	-0,00134	0,00008	0,00037	0,0007	0,0019	0,0016
p_{km}	41	-0,00002	-0,00004	-0,00003	0,00042	0,00057	-0,00008	0,0016	0,0014	0,0020
p_{km}	42	-0,00002	-0,00004	-0,00003	-0,00012	-0,00169	-0,00097	0,0019	0,0003	0,0011
p_{km}	43	0,00000	-0,00001	-0,00002	0,00042	-0,00126	-0,00039	0,0016	0,0007	0,0016
p_{km}	44	0,00000	-0,00001	-0,00002	-0,00190	-0,00063	-0,00029	0,0001	0,0014	0,0017
p_{km}	45	-0,00001	-0,00001	-0,00001	-0,00104	-0,00053	0,00188	0,0010	0,0015	0,0001
p_{km}	46	-0,00057	-0,00054	-0,00054	-0,00024	-0,00025	0,00053	0,0017	0,0017	0,0009
p_{km}	47	-0,00057	-0,00054	-0,00054	0,00118	0,00043	0,00089	0,0002	0,0010	0,0006
p_{km}	48	-0,00051	-0,00050	-0,00049	-0,00013	0,00005	0,00001	0,0016	0,0015	0,0015
p_{km}	49	-0,00023	-0,00024	-0,00023	0,00023	0,00065	0,00008	0,0015	0,0011	0,0017
p_{km}	50	-0,00003	-0,00001	-0,00001	-0,00058	0,00051	-0,00090	0,0014	0,0015	0,0011
p_{km}	51	0,00000	0,00002	-0,00001	-0,00079	-0,00188	0,00147	0,0012	0,0001	0,0005
p_{km}	52	-0,00076	-0,00076	-0,00079	0,00026	-0,00012	-0,00081	0,0010	0,0014	0,0020
p_{km}	53	-0,00075	-0,00075	-0,00078	0,00016	-0,00262	-0,00148	0,0011	0,0001	0,0013
p_{km}	54	-0,00075	-0,00075	-0,00076	-0,00069	-0,00112	-0,00059	0,0019	0,0016	0,0018
p_{km}	55	-0,00075	-0,00074	-0,00077	-0,00095	-0,00082	0,00070	0,0018	0,0019	0,0005
p_{km}	56	-0,00076	-0,00075	-0,00078	-0,00070	-0,00121	-0,00163	0,0019	0,0015	0,0011
p_{km}	57	-0,00089	-0,00088	-0,00090	-0,00014	-0,00040	-0,00158	0,0013	0,0015	0,0013
p_{km}	58	-0,00095	-0,00094	-0,00097	0,00023	-0,00038	-0,00181	0,0008	0,0014	0,0012
p_{km}	59	-0,00090	-0,00091	-0,00091	-0,00184	-0,00105	-0,00222	0,0011	0,0019	0,0007

p_{km}	60	-0,00093	-0,00094	-0,00094	-0,00159	0,00036	-0,00146	0,0013	0,0007	0,0015
p_{km}	61	-0,00020	-0,00019	-0,00020	0,00169	-0,00204	-0,00020	0,0001	0,0002	0,0020
p_{km}	62	-0,00016	-0,00019	-0,00017	-0,00005	-0,00201	-0,00136	0,0019	0,0002	0,0008
p_{km}	63	-0,00016	-0,00019	-0,00017	-0,00086	-0,00205	-0,00065	0,0013	0,0001	0,0015
p_{km}	64	-0,00003	-0,00004	-0,00003	0,00135	0,00127	0,00002	0,0006	0,0007	0,0020
p_{km}	65	-0,00001	-0,00003	-0,00003	-0,00173	-0,00004	0,00011	0,0003	0,0020	0,0019
p_{km}	66	-0,00001	-0,00001	-0,00001	-0,00117	-0,00017	0,00189	0,0008	0,0018	0,0001
p_{km}	67	-0,00003	-0,00005	-0,00002	-0,00085	-0,00140	-0,00173	0,0012	0,0006	0,0003
p_{km}	68	0,00000	-0,00002	-0,00001	0,00138	-0,00092	-0,00021	0,0006	0,0011	0,0018
p_{mk}	1	0,00177	0,00185	0,00177	0,00342	0,00292	0,00356	0,0003	0,0009	0,0002
p_{mk}	2	0,00177	0,00185	0,00177	0,00150	0,00155	0,00076	0,0017	0,0017	0,0010
p_{mk}	3	0,00162	0,00167	0,00160	0,00085	0,00297	0,00325	0,0012	0,0007	0,0003
p_{mk}	4	0,00104	0,00113	0,00105	0,00010	0,00140	0,00047	0,0011	0,0017	0,0014
p_{mk}	5	0,00107	0,00116	0,00108	0,00167	0,00196	-0,00077	0,0014	0,0012	0,0001
p_{mk}	6	0,00109	0,00119	0,00112	0,00074	-0,00006	0,00061	0,0016	0,0007	0,0015
p_{mk}	7	0,00106	0,00117	0,00111	0,00102	0,00005	0,00199	0,0020	0,0009	0,0011
p_{mk}	8	0,00098	0,00111	0,00104	0,00047	0,00144	0,00253	0,0015	0,0017	0,0005
p_{mk}	9	0,00022	0,00034	0,00023	-0,00033	-0,00062	0,00089	0,0015	0,0010	0,0013
p_{mk}	10	0,00022	0,00033	0,00023	0,00155	0,00050	0,00199	0,0007	0,0018	0,0002
p_{mk}	11	0,00014	0,00022	0,00011	0,00078	-0,00135	-0,00109	0,0014	0,0004	0,0008
p_{mk}	12	0,00004	0,00007	0,00000	0,00024	0,00120	0,00023	0,0018	0,0009	0,0018
p_{mk}	13	0,00004	0,00007	0,00000	-0,00177	-0,00087	0,00025	0,0002	0,0011	0,0018
p_{mk}	14	0,00005	0,00006	0,00000	-0,00168	0,00163	0,00062	0,0003	0,0004	0,0014
p_{mk}	15	0,00005	0,00006	0,00000	-0,00042	-0,00050	-0,00017	0,0015	0,0014	0,0018
p_{mk}	16	0,00004	0,00005	0,00000	0,00042	-0,00159	-0,00019	0,0016	0,0004	0,0018
p_{mk}	17	0,00007	0,00006	0,00003	0,00074	-0,00174	-0,00055	0,0013	0,0002	0,0014
p_{mk}	18	0,00009	0,00010	0,00005	0,00079	0,00201	-0,00058	0,0013	0,0001	0,0014
p_{mk}	19	0,00009	0,00010	0,00005	0,00095	0,00198	0,00163	0,0011	0,0001	0,0004
p_{mk}	20	0,00009	0,00010	0,00005	-0,00166	0,00074	-0,00107	0,0002	0,0014	0,0009
p_{mk}	21	0,00003	0,00004	0,00000	-0,00060	-0,00110	-0,00182	0,0014	0,0009	0,0002
p_{mk}	22	0,00003	0,00003	0,00002	-0,00039	0,00124	-0,00022	0,0016	0,0008	0,0018
p_{mk}	23	0,00003	0,00003	0,00002	0,00143	0,00057	0,00100	0,0006	0,0015	0,0010
p_{mk}	24	0,00003	0,00001	0,00002	-0,00087	0,00023	-0,00056	0,0011	0,0018	0,0014
p_{mk}	25	0,00003	0,00001	0,00002	0,00098	0,00027	-0,00129	0,0010	0,0017	0,0007
p_{mk}	26	0,00001	0,00002	0,00000	0,00032	0,00166	-0,00058	0,0017	0,0004	0,0014
p_{mk}	27	0,00007	0,00005	0,00009	-0,00101	-0,00057	-0,00089	0,0009	0,0014	0,0010
p_{mk}	28	0,00006	0,00003	0,00007	-0,00030	0,00012	-0,00006	0,0016	0,0019	0,0019
p_{mk}	29	0,00002	0,00000	0,00004	0,00124	0,00022	0,00066	0,0008	0,0018	0,0014
p_{mk}	30	0,00002	0,00000	0,00004	-0,00143	0,00105	-0,00048	0,0006	0,0009	0,0015
p_{mk}	31	0,00002	0,00000	0,00004	0,00122	0,00119	0,00084	0,0008	0,0008	0,0012
p_{mk}	32	0,00002	0,00000	0,00004	-0,00063	0,00163	0,00113	0,0013	0,0004	0,0009
p_{mk}	33	0,00002	0,00000	0,00001	0,00081	-0,00150	-0,00006	0,0012	0,0005	0,0019
p_{mk}	34	-0,00001	-0,00001	0,00000	0,00084	-0,00119	-0,00012	0,0011	0,0008	0,0019
p_{mk}	35	0,00007	0,00012	0,00007	-0,00189	0,00135	-0,00004	0,0000	0,0008	0,0019
p_{mk}	36	0,00005	0,00010	0,00006	-0,00120	0,00060	-0,00193	0,0007	0,0015	0,0000
p_{mk}	37	0,00004	0,00007	0,00004	0,00199	-0,00122	0,00044	0,0001	0,0007	0,0016
p_{mk}	38	0,00004	0,00007	0,00004	-0,00140	-0,00112	0,00084	0,0006	0,0008	0,0012
p_{mk}	39	0,00002	0,00006	0,00004	0,00191	0,00066	-0,00071	0,0001	0,0014	0,0013
p_{mk}	40	0,00002	0,00005	0,00002	0,00165	0,00165	0,00026	0,0004	0,0004	0,0018
p_{mk}	41	0,00002	0,00004	0,00003	0,00116	0,00086	-0,00194	0,0009	0,0012	0,0000
p_{mk}	42	0,00002	0,00004	0,00003	0,00154	-0,00128	-0,00118	0,0005	0,0007	0,0008
p_{mk}	43	0,00000	0,00001	0,00002	0,00036	-0,00060	-0,00024	0,0016	0,0014	0,0017
p_{mk}	44	0,00000	0,00001	0,00002	0,00119	-0,00038	0,00067	0,0008	0,0016	0,0013
p_{mk}	45	0,00001	0,00001	0,00001	-0,00047	0,00047	0,00089	0,0015	0,0015	0,0011
p_{mk}	46	0,00057	0,00054	0,00054	-0,00066	0,00109	0,00174	0,0008	0,0015	0,0008
p_{mk}	47	0,00056	0,00053	0,00053	0,00074	-0,00069	-0,00095	0,0018	0,0008	0,0005
p_{mk}	48	0,00049	0,00048	0,00047	0,00231	0,00221	0,00031	0,0002	0,0003	0,0018
p_{mk}	49	0,00023	0,00023	0,00023	0,00202	0,00060	0,00081	0,0002	0,0016	0,0014
p_{mk}	50	0,00003	0,00001	0,00001	0,00025	0,00089	0,00021	0,0018	0,0011	0,0018
p_{mk}	51	0,00000	-0,00002	0,00001	-0,00086	0,00032	-0,00043	0,0011	0,0017	0,0016
p_{mk}	52	0,00076	0,00077	0,00080	0,00184	0,00155	0,00230	0,0009	0,0012	0,0005
p_{mk}	53	0,00076	0,00076	0,00079	0,00256	0,00089	0,00086	0,0002	0,0019	0,0019
p_{mk}	54	0,00076	0,00076	0,00077	0,00062	-0,00025	0,00125	0,0019	0,0010	0,0015

p_{mk}	55	0,00076	0,00075	0,00078	0,00125	0,00089	-0,00044	0,0015	0,0019	0,0008
p_{mk}	56	0,00089	0,00088	0,00090	0,00152	0,00004	0,00062	0,0014	0,0012	0,0017
p_{mk}	57	0,00095	0,00094	0,00097	0,00275	0,00034	0,00028	0,0002	0,0014	0,0013
p_{mk}	58	0,00097	0,00097	0,00099	0,00223	0,00054	-0,00074	0,0007	0,0016	0,0003
p_{mk}	59	0,00093	0,00095	0,00094	0,00039	0,00007	0,00012	0,0015	0,0011	0,0012
p_{mk}	60	0,00095	0,00096	0,00096	0,00291	0,00037	-0,00011	0,0000	0,0014	0,0009
p_{mk}	61	0,00020	0,00019	0,00020	0,00214	-0,00085	0,00055	0,0001	0,0010	0,0016
p_{mk}	62	0,00016	0,00019	0,00017	0,00211	-0,00064	-0,00070	0,0001	0,0012	0,0011
p_{mk}	63	0,00017	0,00019	0,00017	0,00207	-0,00068	0,00147	0,0001	0,0011	0,0007
p_{mk}	64	0,00003	0,00004	0,00003	-0,00069	0,00145	0,00012	0,0013	0,0006	0,0019
p_{mk}	65	0,00001	0,00003	0,00003	0,00032	-0,00063	0,00146	0,0017	0,0013	0,0006
p_{mk}	66	0,00001	0,00001	0,00001	0,00064	0,00084	-0,00114	0,0014	0,0012	0,0008
p_{mk}	67	0,00003	0,00005	0,00002	0,00032	-0,00147	-0,00162	0,0017	0,0005	0,0004
p_{mk}	68	0,00000	0,00002	0,00001	0,00104	-0,00001	-0,00001	0,0010	0,0020	0,0020
q_{km}	1	0,04898	0,04885	0,04908	0,04760	0,04751	0,05081	0,0006	0,0007	0,0003
q_{km}	2	0,04898	0,04885	0,04908	0,04921	0,04964	0,05084	0,0018	0,0012	0,0002
q_{km}	3	0,04553	0,04550	0,04569	0,04589	0,04661	0,04705	0,0016	0,0009	0,0006
q_{km}	4	0,03509	0,03504	0,03519	0,03604	0,03509	0,03509	0,0010	0,0020	0,0019
q_{km}	5	0,03506	0,03501	0,03516	0,03404	0,03501	0,03700	0,0010	0,0020	0,0002
q_{km}	6	0,03470	0,03466	0,03479	0,03500	0,03524	0,03324	0,0017	0,0014	0,0004
q_{km}	7	0,03387	0,03384	0,03397	0,03500	0,03433	0,03559	0,0009	0,0015	0,0004
q_{km}	8	0,03232	0,03233	0,03246	0,03275	0,03409	0,03431	0,0016	0,0002	0,0002
q_{km}	9	0,00941	0,00944	0,00950	0,00995	0,01072	0,01035	0,0015	0,0007	0,0011
q_{km}	10	0,00903	0,00903	0,00912	0,00819	0,00894	0,01028	0,0012	0,0019	0,0008
q_{km}	11	0,00680	0,00681	0,00688	0,00692	0,00801	0,00757	0,0019	0,0008	0,0013
q_{km}	12	0,00432	0,00431	0,00439	0,00396	0,00243	0,00431	0,0016	0,0001	0,0019
q_{km}	13	0,00421	0,00421	0,00427	0,00223	0,00478	0,00449	0,0000	0,0014	0,0018
q_{km}	14	0,00411	0,00409	0,00416	0,00568	0,00409	0,00435	0,0004	0,0020	0,0018
q_{km}	15	0,00410	0,00408	0,00415	0,00334	0,00399	0,00607	0,0012	0,0019	0,0001
q_{km}	16	0,00353	0,00354	0,00360	0,00267	0,00388	0,00435	0,0011	0,0017	0,0012
q_{km}	17	0,00285	0,00285	0,00289	0,00240	0,00183	0,00162	0,0015	0,0010	0,0007
q_{km}	18	0,00217	0,00215	0,00219	0,00281	0,00243	0,00076	0,0014	0,0017	0,0006
q_{km}	19	0,00217	0,00215	0,00218	0,00372	0,00340	0,00348	0,0004	0,0008	0,0007
q_{km}	20	0,00214	0,00214	0,00216	0,00129	0,00346	0,00226	0,0011	0,0007	0,0019
q_{km}	21	0,00074	0,00075	0,00076	0,00000	-0,00076	-0,00037	0,0013	0,0005	0,0009
q_{km}	22	0,00070	0,00070	0,00070	0,00181	-0,00042	-0,00109	0,0009	0,0009	0,0002
q_{km}	23	0,00070	0,00070	0,00070	-0,00012	0,00037	0,00152	0,0012	0,0017	0,0012
q_{km}	24	0,00034	0,00035	0,00034	-0,00157	0,00098	0,00049	0,0001	0,0014	0,0018
q_{km}	25	0,00034	0,00035	0,00034	-0,00009	0,00008	0,00096	0,0016	0,0017	0,0014
q_{km}	26	0,00016	0,00017	0,00017	-0,00034	0,00118	-0,00162	0,0015	0,0010	0,0002
q_{km}	27	0,00111	0,00109	0,00114	0,00136	0,00064	0,00081	0,0018	0,0015	0,0017
q_{km}	28	0,00081	0,00077	0,00082	0,00219	0,00188	0,00094	0,0006	0,0009	0,0019
q_{km}	29	0,00049	0,00046	0,00049	-0,00033	-0,00028	0,00205	0,0012	0,0013	0,0004
q_{km}	30	0,00049	0,00046	0,00049	0,00137	0,00028	-0,00125	0,0011	0,0018	0,0003
q_{km}	31	0,00049	0,00046	0,00049	0,00132	0,00115	0,00119	0,0012	0,0013	0,0013
q_{km}	32	0,00049	0,00046	0,00049	-0,00097	0,00111	-0,00054	0,0005	0,0013	0,0010
q_{km}	33	0,00032	0,00028	0,00032	-0,00147	-0,00141	-0,00003	0,0002	0,0003	0,0017
q_{km}	34	0,00008	0,00005	0,00007	-0,00051	-0,00038	-0,00058	0,0014	0,0016	0,0013
q_{km}	35	0,00233	0,00225	0,00225	0,00119	0,00175	0,00129	0,0009	0,0015	0,0010
q_{km}	36	0,00201	0,00192	0,00193	0,00207	0,00363	0,00274	0,0019	0,0003	0,0012
q_{km}	37	0,00169	0,00161	0,00161	0,00029	0,00185	-0,00037	0,0006	0,0018	0,0000
q_{km}	38	0,00169	0,00161	0,00161	0,00050	0,00067	0,00338	0,0008	0,0011	0,0002
q_{km}	39	0,00138	0,00132	0,00133	0,00222	0,00212	0,00152	0,0012	0,0012	0,0018
q_{km}	40	0,00109	0,00102	0,00104	0,00208	0,00296	-0,00010	0,0010	0,0001	0,0009
q_{km}	41	0,00106	0,00101	0,00102	0,00268	0,00135	0,00001	0,0004	0,0017	0,0010
q_{km}	42	0,00106	0,00101	0,00102	0,00235	0,00030	0,00112	0,0007	0,0013	0,0019
q_{km}	43	0,00097	0,00093	0,00094	-0,00062	0,00127	0,00082	0,0004	0,0017	0,0019
q_{km}	44	0,00097	0,00093	0,00094	0,00257	-0,00057	-0,00093	0,0004	0,0005	0,0001
q_{km}	45	0,00048	0,00046	0,00047	0,00148	0,00192	-0,00107	0,0010	0,0005	0,0005
q_{km}	46	0,01044	0,01046	0,01050	0,01211	0,01189	0,00894	0,0003	0,0006	0,0004
q_{km}	47	0,01044	0,01046	0,01050	0,01107	0,01126	0,01236	0,0014	0,0012	0,0001
q_{km}	48	0,00947	0,00947	0,00949	0,01079	0,01055	0,00909	0,0007	0,0009	0,0016
q_{km}	49	0,00471	0,00472	0,00472	0,00371	0,00548	0,00555	0,0010	0,0012	0,0012

q_{km}	50	0,00055	0,00053	0,00051	0,00136	-0,00020	-0,00069	0,0012	0,0013	0,0008
q_{km}	51	0,00005	0,00004	0,00003	-0,00113	0,00175	-0,00039	0,0008	0,0003	0,0016
q_{km}	52	0,02249	0,02250	0,02255	0,02303	0,02119	0,02350	0,0015	0,0007	0,0010
q_{km}	53	0,02238	0,02240	0,02243	0,02224	0,02052	0,02275	0,0019	0,0001	0,0017
q_{km}	54	0,02198	0,02199	0,02204	0,02144	0,02117	0,02062	0,0015	0,0012	0,0006
q_{km}	55	0,02160	0,02159	0,02164	0,02173	0,02079	0,02056	0,0019	0,0012	0,0009
q_{km}	56	0,02151	0,02149	0,02155	0,01968	0,02279	0,02008	0,0002	0,0007	0,0005
q_{km}	57	0,02100	0,02098	0,02104	0,02208	0,02293	0,02072	0,0009	0,0000	0,0017
q_{km}	58	0,02075	0,02073	0,02079	0,02130	0,02201	0,02062	0,0014	0,0007	0,0018
q_{km}	59	0,01942	0,01941	0,01946	0,02050	0,01743	0,01934	0,0009	0,0000	0,0019
q_{km}	60	0,01932	0,01930	0,01935	0,02021	0,01858	0,02061	0,0011	0,0013	0,0007
q_{km}	61	0,00387	0,00388	0,00393	0,00330	0,00349	0,00474	0,0014	0,0016	0,0012
q_{km}	62	0,00350	0,00350	0,00354	0,00204	0,00470	0,00240	0,0005	0,0008	0,0009
q_{km}	63	0,00350	0,00350	0,00354	0,00393	0,00539	0,00373	0,0016	0,0001	0,0018
q_{km}	64	0,00071	0,00071	0,00072	0,00132	-0,00122	-0,00059	0,0014	0,0001	0,0007
q_{km}	65	0,00043	0,00044	0,00046	-0,00011	-0,00136	-0,00012	0,0015	0,0002	0,0014
q_{km}	66	0,00022	0,00023	0,00022	-0,00071	-0,00059	-0,00078	0,0011	0,0012	0,0010
q_{km}	67	0,00067	0,00069	0,00069	0,00189	0,00081	0,00263	0,0008	0,0019	0,0001
q_{km}	68	0,00034	0,00034	0,00035	0,00085	-0,00161	0,00144	0,0015	0,0001	0,0009
q_{mk}	1	-0,04898	-0,04885	-0,04908	-0,04808	-0,04868	-0,05076	0,0011	0,0018	0,0003
q_{mk}	2	-0,04898	-0,04884	-0,04907	-0,04815	-0,04806	-0,04989	0,0012	0,0012	0,0012
q_{mk}	3	-0,04553	-0,04550	-0,04568	-0,04428	-0,04629	-0,04450	0,0008	0,0012	0,0008
q_{mk}	4	-0,03506	-0,03501	-0,03516	-0,03594	-0,03401	-0,03536	0,0011	0,0010	0,0018
q_{mk}	5	-0,03475	-0,03470	-0,03484	-0,03499	-0,03299	-0,03450	0,0018	0,0003	0,0017
q_{mk}	6	-0,03437	-0,03433	-0,03446	-0,03399	-0,03260	-0,03483	0,0016	0,0003	0,0016
q_{mk}	7	-0,03379	-0,03377	-0,03389	-0,03329	-0,03336	-0,03234	0,0015	0,0016	0,0005
q_{mk}	8	-0,03229	-0,03230	-0,03243	-0,03151	-0,03335	-0,03219	0,0012	0,0009	0,0018
q_{mk}	9	-0,00937	-0,00939	-0,00945	-0,00873	-0,01102	-0,01043	0,0014	0,0004	0,0010
q_{mk}	10	-0,00902	-0,00902	-0,00911	-0,01055	-0,01058	-0,01019	0,0005	0,0004	0,0009
q_{mk}	11	-0,00677	-0,00679	-0,00686	-0,00659	-0,00527	-0,00547	0,0018	0,0005	0,0006
q_{mk}	12	-0,00431	-0,00430	-0,00438	-0,00269	-0,00472	-0,00443	0,0004	0,0016	0,0019
q_{mk}	13	-0,00420	-0,00419	-0,00426	-0,00481	-0,00232	-0,00451	0,0014	0,0001	0,0018
q_{mk}	14	-0,00410	-0,00408	-0,00415	-0,00516	-0,00218	-0,00585	0,0009	0,0001	0,0003
q_{mk}	15	-0,00409	-0,00408	-0,00414	-0,00487	-0,00416	-0,00324	0,0012	0,0019	0,0011
q_{mk}	16	-0,00353	-0,00354	-0,00359	-0,00375	-0,00304	-0,00321	0,0018	0,0015	0,0016
q_{mk}	17	-0,00285	-0,00285	-0,00289	-0,00221	-0,00438	-0,00323	0,0014	0,0005	0,0017
q_{mk}	18	-0,00217	-0,00215	-0,00218	-0,00157	-0,00076	-0,00385	0,0014	0,0006	0,0003
q_{mk}	19	-0,00217	-0,00215	-0,00218	-0,00078	-0,00123	-0,00395	0,0006	0,0011	0,0002
q_{mk}	20	-0,00214	-0,00214	-0,00216	-0,00301	-0,00393	-0,00317	0,0011	0,0002	0,0010
q_{mk}	21	-0,00074	-0,00075	-0,00076	0,00006	0,00028	-0,00235	0,0012	0,0010	0,0004
q_{mk}	22	-0,00070	-0,00070	-0,00070	0,00065	-0,00228	-0,00128	0,0007	0,0004	0,0014
q_{mk}	23	-0,00070	-0,00070	-0,00070	-0,00070	-0,00143	-0,00048	0,0020	0,0013	0,0018
q_{mk}	24	-0,00034	-0,00035	-0,00034	-0,00156	0,00095	-0,00144	0,0008	0,0007	0,0009
q_{mk}	25	-0,00034	-0,00035	-0,00034	-0,00093	0,00121	0,00051	0,0014	0,0004	0,0012
q_{mk}	26	-0,00016	-0,00017	-0,00017	-0,00146	0,00046	-0,00050	0,0007	0,0014	0,0017
q_{mk}	27	-0,00111	-0,00109	-0,00114	-0,00055	-0,00244	0,00020	0,0014	0,0007	0,0007
q_{mk}	28	-0,00081	-0,00077	-0,00082	-0,00001	0,00057	-0,00197	0,0012	0,0007	0,0008
q_{mk}	29	-0,00049	-0,00046	-0,00049	0,00107	-0,00156	0,00035	0,0004	0,0009	0,0012
q_{mk}	30	-0,00049	-0,00046	-0,00049	-0,00121	0,00025	-0,00103	0,0013	0,0013	0,0015
q_{mk}	31	-0,00049	-0,00046	-0,00049	-0,00142	-0,00228	-0,00001	0,0011	0,0002	0,0015
q_{mk}	32	-0,00049	-0,00046	-0,00049	-0,00085	-0,00094	-0,00069	0,0016	0,0015	0,0018
q_{mk}	33	-0,00032	-0,00028	-0,00032	0,00134	0,00042	0,00003	0,0003	0,0013	0,0017
q_{mk}	34	-0,00008	-0,00005	-0,00007	0,00088	-0,00172	-0,00033	0,0010	0,0003	0,0017
q_{mk}	35	-0,00233	-0,00225	-0,00225	-0,00279	-0,00254	-0,00252	0,0015	0,0017	0,0017
q_{mk}	36	-0,00201	-0,00192	-0,00193	-0,00128	-0,00023	-0,00040	0,0013	0,0003	0,0005
q_{mk}	37	-0,00169	-0,00161	-0,00161	-0,00184	-0,00018	-0,00105	0,0018	0,0006	0,0014
q_{mk}	38	-0,00169	-0,00161	-0,00161	-0,00266	-0,00335	-0,00085	0,0010	0,0003	0,0012
q_{mk}	39	-0,00138	-0,00132	-0,00133	-0,00224	-0,00072	0,00047	0,0011	0,0014	0,0002
q_{mk}	40	-0,00109	-0,00102	-0,00104	-0,00236	-0,00115	-0,00066	0,0007	0,0019	0,0016
q_{mk}	41	-0,00106	-0,00101	-0,00102	-0,00164	-0,00298	-0,00181	0,0014	0,0000	0,0012
q_{mk}	42	-0,00106	-0,00101	-0,00102	-0,00145	-0,00157	-0,00113	0,0016	0,0014	0,0019
q_{mk}	43	-0,00097	-0,00093	-0,00094	0,00058	-0,00250	0,00012	0,0005	0,0004	0,0009
q_{mk}	44	-0,00097	-0,00093	-0,00094	-0,00061	-0,00044	0,00085	0,0016	0,0015	0,0002

q_{mk}	45	-0,00048	-0,00046	-0,00047	0,00110	0,00144	-0,00118	0,0004	0,0001	0,0013
q_{mk}	46	-0,01044	-0,01046	-0,01050	-0,01149	-0,01216	-0,01016	0,0009	0,0003	0,0017
q_{mk}	47	-0,01042	-0,01044	-0,01049	-0,01113	-0,01188	-0,01207	0,0013	0,0006	0,0004
q_{mk}	48	-0,00943	-0,00943	-0,00946	-0,00920	-0,01054	-0,00754	0,0018	0,0009	0,0001
q_{mk}	49	-0,00471	-0,00472	-0,00472	-0,00623	-0,00463	-0,00349	0,0005	0,0019	0,0008
q_{mk}	50	-0,00055	-0,00053	-0,00051	-0,00096	0,00108	-0,00021	0,0016	0,0004	0,0017
q_{mk}	51	-0,00005	-0,00004	-0,00003	-0,00008	-0,00170	-0,00046	0,0020	0,0003	0,0016
q_{mk}	52	-0,02242	-0,02243	-0,02249	-0,02135	-0,02183	-0,02432	0,0009	0,0014	0,0002
q_{mk}	53	-0,02231	-0,02232	-0,02236	-0,02220	-0,02162	-0,02382	0,0019	0,0013	0,0005
q_{mk}	54	-0,02188	-0,02189	-0,02194	-0,02286	-0,02072	-0,02343	0,0010	0,0008	0,0005
q_{mk}	55	-0,02151	-0,02149	-0,02155	-0,01985	-0,02264	-0,02211	0,0003	0,0009	0,0014
q_{mk}	56	-0,02100	-0,02098	-0,02104	-0,02015	-0,02226	-0,02262	0,0011	0,0007	0,0004
q_{mk}	57	-0,02075	-0,02073	-0,02079	-0,01895	-0,02105	-0,02101	0,0002	0,0017	0,0018
q_{mk}	58	-0,02065	-0,02064	-0,02069	-0,02004	-0,02155	-0,02014	0,0014	0,0011	0,0014
q_{mk}	59	-0,01932	-0,01930	-0,01935	-0,02020	-0,01903	-0,01932	0,0011	0,0017	0,0020
q_{mk}	60	-0,01916	-0,01915	-0,01920	-0,02008	-0,02005	-0,01830	0,0011	0,0011	0,0011
q_{mk}	61	-0,00387	-0,00388	-0,00393	-0,00435	-0,00221	-0,00516	0,0015	0,0003	0,0008
q_{mk}	62	-0,00350	-0,00350	-0,00354	-0,00472	-0,00408	-0,00433	0,0008	0,0014	0,0012
q_{mk}	63	-0,00349	-0,00349	-0,00353	-0,00175	-0,00250	-0,00332	0,0003	0,0010	0,0018
q_{mk}	64	-0,00071	-0,00071	-0,00072	0,00067	-0,00137	0,00024	0,0006	0,0013	0,0010
q_{mk}	65	-0,00043	-0,00044	-0,00046	-0,00173	0,00150	-0,00087	0,0007	0,0001	0,0016
q_{mk}	66	-0,00022	-0,00023	-0,00022	0,00102	-0,00125	-0,00025	0,0008	0,0010	0,0020
q_{mk}	67	-0,00067	-0,00069	-0,00069	-0,00058	0,00057	-0,00060	0,0019	0,0007	0,0019
q_{mk}	68	-0,00034	-0,00034	-0,00035	-0,00144	-0,00100	-0,00165	0,0009	0,0013	0,0007
p_k	1	-0,00177	-0,00185	-0,00177	-0,00121	-0,00234	-0,00260	0,0014	0,0015	0,0012
p_k	2	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00131	-0,00059	-0,00181	0,0007	0,0014	0,0002
p_k	3	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00081	-0,00145	0,00173	0,0012	0,0005	0,0003
p_k	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00084	0,00188	0,00198	0,0012	0,0001	0,0000
p_k	5	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00075	-0,00124	0,00187	0,0013	0,0008	0,0001
p_k	6	0,00001	0,00000	0,00000	0,00033	-0,00058	0,00127	0,0017	0,0014	0,0007
p_k	7	0,00004	0,00003	0,00001	-0,00113	-0,00087	0,00191	0,0008	0,0011	0,0001
p_k	8	0,00006	0,00006	0,00007	0,00149	0,00039	-0,00110	0,0006	0,0017	0,0008
p_k	9	0,00002	0,00002	0,00003	0,00047	0,00157	0,00080	0,0016	0,0004	0,0012
p_k	10	0,00000	0,00001	0,00001	-0,00139	-0,00021	-0,00007	0,0006	0,0018	0,0019
p_k	11	0,00008	0,00009	0,00009	0,00026	-0,00149	0,00010	0,0018	0,0004	0,0020
p_k	12	0,00008	0,00010	0,00010	0,00145	-0,00161	-0,00009	0,0006	0,0003	0,0018
p_k	13	0,00000	0,00001	0,00001	0,00051	0,00122	0,00109	0,0015	0,0008	0,0009
p_k	14	0,00000	0,00001	0,00000	0,00193	0,00041	0,00069	0,0001	0,0016	0,0013
p_k	15	0,00000	0,00000	0,00000	0,00116	-0,00175	-0,00064	0,0008	0,0002	0,0014
p_k	16	0,00001	0,00001	0,00000	0,00044	0,00176	0,00039	0,0016	0,0002	0,0016
p_k	17	-0,00003	-0,00001	-0,00003	0,00080	-0,00073	-0,00010	0,0012	0,0013	0,0019
p_k	18	-0,00002	-0,00003	-0,00002	0,00071	-0,00047	0,00057	0,0013	0,0016	0,0014
p_k	19	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00113	-0,00061	0,00158	0,0009	0,0014	0,0004
p_k	20	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00161	0,00055	-0,00054	0,0004	0,0015	0,0015
p_k	21	0,00007	0,00005	0,00005	0,00001	0,00190	-0,00059	0,0019	0,0002	0,0014
p_k	22	-0,00001	0,00002	-0,00001	-0,00133	0,00033	0,00059	0,0007	0,0017	0,0014
p_k	23	0,00000	0,00000	0,00000	0,00100	0,00143	0,00011	0,0010	0,0006	0,0019
p_k	24	0,00001	0,00001	-0,00001	0,00033	-0,00125	0,00014	0,0017	0,0007	0,0018
p_k	25	0,00000	0,00000	0,00000	0,00095	0,00162	0,00143	0,0011	0,0004	0,0006
p_k	26	0,00001	-0,00001	0,00002	0,00088	-0,00105	-0,00043	0,0011	0,0010	0,0015
p_k	27	0,00001	0,00002	0,00000	-0,00080	0,00108	-0,00060	0,0012	0,0009	0,0014
p_k	28	0,00001	0,00002	0,00003	-0,00001	0,00103	0,00107	0,0020	0,0010	0,0010
p_k	29	0,00004	0,00002	0,00003	0,00084	-0,00094	-0,00043	0,0012	0,0010	0,0015
p_k	30	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00123	-0,00114	-0,00087	0,0008	0,0009	0,0011
p_k	31	0,00000	0,00000	0,00000	0,00018	0,00049	0,00044	0,0018	0,0015	0,0016
p_k	32	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00176	-0,00064	-0,00157	0,0002	0,0014	0,0004
p_k	33	0,00000	0,00000	0,00003	-0,00073	-0,00024	0,00038	0,0013	0,0018	0,0017
p_k	34	0,00003	0,00002	0,00000	-0,00040	-0,00029	0,00007	0,0016	0,0017	0,0019
p_k	35	-0,00001	-0,00001	0,00000	-0,00093	-0,00125	-0,00057	0,0011	0,0008	0,0014
p_k	36	0,00002	0,00003	0,00001	0,00122	-0,00046	-0,00046	0,0008	0,0015	0,0015
p_k	37	0,00001	0,00003	0,00002	-0,00123	-0,00141	0,00010	0,0008	0,0006	0,0019
p_k	38	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00132	-0,00126	0,00122	0,0007	0,0007	0,0008
p_k	39	0,00002	0,00001	0,00000	0,00158	0,00061	0,00012	0,0004	0,0014	0,0019

p_k	40	0,00000	0,00001	0,00002	-0,00115	-0,00038	-0,00008	0,0009	0,0016	0,0019
p_k	41	0,00001	0,00001	-0,00001	-0,00051	0,00151	0,00113	0,0015	0,0005	0,0009
p_k	42	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00099	-0,00198	-0,00155	0,0010	0,0000	0,0004
p_k	43	0,00001	0,00002	0,00001	-0,00112	0,00183	0,00080	0,0009	0,0002	0,0012
p_k	44	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00001	-0,00087	-0,00031	0,0020	0,0011	0,0017
p_k	45	0,00000	0,00001	0,00001	0,00151	-0,00035	-0,00040	0,0005	0,0016	0,0016
p_k	46	0,00001	0,00001	0,00001	0,00180	0,00083	0,00110	0,0002	0,0012	0,0009
p_k	47	0,00000	0,00000	0,00000	0,00030	-0,00072	0,00012	0,0017	0,0013	0,0019
p_k	48	0,00005	0,00003	0,00004	0,00048	0,00038	0,00189	0,0016	0,0016	0,0001
p_k	49	0,00026	0,00024	0,00023	0,00004	0,00136	-0,00061	0,0018	0,0009	0,0012
p_k	50	0,00023	0,00023	0,00023	-0,00008	-0,00032	0,00071	0,0017	0,0014	0,0015
p_k	51	0,00002	0,00003	0,00000	0,00153	-0,00055	-0,00092	0,0005	0,0014	0,0011
p_k	52	0,00000	-0,00002	0,00001	0,00187	-0,00167	-0,00162	0,0001	0,0003	0,0004
p_k	53	0,00001	0,00002	0,00001	-0,00106	0,00050	-0,00019	0,0009	0,0015	0,0018
p_k	54	0,00001	0,00001	0,00003	-0,00151	0,00091	0,00003	0,0005	0,0011	0,0020
p_k	55	0,00001	0,00002	0,00001	-0,00150	0,00083	-0,00158	0,0005	0,0012	0,0004
p_k	56	0,00000	0,00000	0,00000	0,00172	0,00013	-0,00057	0,0003	0,0019	0,0014
p_k	57	0,00000	0,00000	0,00000	0,00036	0,00011	0,00138	0,0016	0,0019	0,0006
p_k	58	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00179	0,00008	-0,00073	0,0002	0,0019	0,0013
p_k	59	0,00007	0,00005	0,00008	0,00037	0,00114	0,00010	0,0017	0,0009	0,0020
p_k	60	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00188	0,00003	0,00044	0,0001	0,0020	0,0016
p_k	61	0,00075	0,00077	0,00076	-0,00115	0,00236	0,00090	0,0001	0,0004	0,0019
p_k	62	0,00003	0,00001	0,00002	-0,00152	0,00155	0,00055	0,0005	0,0005	0,0015
p_k	63	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00047	0,00122	-0,00022	0,0015	0,0008	0,0018
p_k	64	0,00013	0,00015	0,00015	0,00069	0,00033	0,00049	0,0014	0,0018	0,0017
p_k	65	0,00003	0,00004	0,00003	0,00094	-0,00117	-0,00157	0,0011	0,0008	0,0004
p_k	66	0,00000	0,00002	0,00002	0,00072	-0,00059	-0,00046	0,0013	0,0014	0,0015
p_k	67	0,00001	0,00001	0,00001	-0,00096	-0,00064	0,00096	0,0010	0,0013	0,0010
p_k	68	0,00003	0,00003	0,00001	-0,00023	-0,00116	-0,00088	0,0017	0,0008	0,0011
p_k	69	0,00000	0,00002	0,00001	-0,00172	-0,00101	-0,00141	0,0003	0,0010	0,0006
q_k	1	0,04898	0,04885	0,04908	0,04838	0,04881	0,04976	0,0014	0,0020	0,0013
q_k	2	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00193	-0,00078	-0,00069	0,0001	0,0012	0,0013
q_k	3	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00115	-0,00148	-0,00113	0,0009	0,0005	0,0009
q_k	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00098	0,00009	0,00093	0,0010	0,0019	0,0011
q_k	5	0,00000	0,00000	0,00000	0,00015	-0,00184	-0,00007	0,0018	0,0002	0,0019
q_k	6	-0,00005	-0,00004	-0,00005	0,00042	-0,00085	-0,00088	0,0015	0,0012	0,0012
q_k	7	-0,00051	-0,00049	-0,00049	-0,00151	-0,00065	-0,00081	0,0010	0,0018	0,0017
q_k	8	-0,00092	-0,00091	-0,00092	0,00013	-0,00235	0,00078	0,0009	0,0006	0,0003
q_k	9	-0,00038	-0,00036	-0,00037	0,00121	-0,00181	0,00040	0,0004	0,0005	0,0012
q_k	10	-0,00034	-0,00036	-0,00034	0,00067	-0,00117	-0,00227	0,0010	0,0012	0,0001
q_k	11	-0,00179	-0,00177	-0,00177	-0,00233	-0,00050	-0,00303	0,0015	0,0007	0,0007
q_k	12	-0,00179	-0,00179	-0,00178	-0,00163	-0,00207	-0,00079	0,0018	0,0017	0,0010
q_k	13	-0,00010	-0,00009	-0,00010	0,00115	0,00178	0,00045	0,0008	0,0001	0,0014
q_k	14	-0,00009	-0,00010	-0,00010	0,00031	-0,00037	0,00167	0,0016	0,0017	0,0002
q_k	15	0,00000	0,00000	0,00000	0,00017	-0,00121	-0,00074	0,0018	0,0008	0,0013
q_k	16	-0,00056	-0,00053	-0,00055	0,00112	0,00003	-0,00212	0,0003	0,0014	0,0004
q_k	17	-0,00068	-0,00070	-0,00070	0,00049	0,00054	-0,00177	0,0008	0,0008	0,0009
q_k	18	-0,00068	-0,00069	-0,00071	-0,00165	-0,00091	-0,00003	0,0010	0,0018	0,0013
q_k	19	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00185	0,00001	0,00085	0,0001	0,0020	0,0011
q_k	20	-0,00003	-0,00001	-0,00003	-0,00039	-0,00133	-0,00120	0,0016	0,0007	0,0008
q_k	21	-0,00140	-0,00139	-0,00140	-0,00143	-0,00054	-0,00076	0,0020	0,0011	0,0014
q_k	22	-0,00005	-0,00006	-0,00006	-0,00170	0,00040	-0,00058	0,0003	0,0015	0,0015
q_k	23	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00180	0,00019	-0,00190	0,0002	0,0018	0,0001
q_k	24	-0,00036	-0,00035	-0,00036	0,00039	-0,00225	-0,00030	0,0013	0,0001	0,0019
q_k	25	0,00000	0,00000	0,00000	0,00052	0,00105	0,00135	0,0015	0,0010	0,0006
q_k	26	-0,00018	-0,00018	-0,00017	-0,00153	-0,00153	0,00046	0,0007	0,0006	0,0014
q_k	27	-0,00016	-0,00017	-0,00017	-0,00092	0,00115	-0,00082	0,0012	0,0007	0,0013
q_k	28	-0,00030	-0,00032	-0,00032	0,00147	0,00159	0,00067	0,0002	0,0001	0,0010
q_k	29	-0,00032	-0,00031	-0,00033	-0,00120	0,00010	0,00163	0,0011	0,0016	0,0000
q_k	30	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00074	0,00044	-0,00107	0,0013	0,0016	0,0009
q_k	31	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00052	0,00110	-0,00029	0,0015	0,0009	0,0017
q_k	32	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00134	0,00170	0,00011	0,0007	0,0003	0,0019
q_k	33	-0,00017	-0,00018	-0,00018	-0,00075	0,00105	-0,00015	0,0014	0,0008	0,0020

q_k	34	-0,00024	-0,00023	-0,00024	-0,00106	0,00164	-0,00191	0,0012	0,0001	0,0003
q_k	35	-0,00008	-0,00005	-0,00007	-0,00073	-0,00008	-0,00106	0,0014	0,0020	0,0010
q_k	36	-0,00032	-0,00032	-0,00032	-0,00137	-0,00085	0,00047	0,0009	0,0015	0,0012
q_k	37	-0,00032	-0,00031	-0,00032	-0,00105	-0,00179	-0,00094	0,0013	0,0005	0,0014
q_k	38	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00108	0,00024	0,00192	0,0009	0,0018	0,0001
q_k	39	-0,00031	-0,00029	-0,00028	0,00020	0,00046	-0,00039	0,0015	0,0012	0,0019
q_k	40	-0,00029	-0,00030	-0,00029	-0,00142	-0,00045	-0,00045	0,0009	0,0018	0,0018
q_k	41	-0,00003	-0,00001	-0,00001	-0,00162	-0,00162	0,00093	0,0004	0,0004	0,0011
q_k	42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00009	-0,00071	0,00085	0,0019	0,0013	0,0011
q_k	43	-0,00009	-0,00008	-0,00008	-0,00025	-0,00167	0,00081	0,0018	0,0004	0,0011
q_k	44	0,00000	0,00000	0,00000	0,00126	-0,00033	0,00096	0,0007	0,0017	0,0010
q_k	45	-0,00049	-0,00047	-0,00047	-0,00244	-0,00104	0,00135	0,0001	0,0014	0,0002
q_k	46	-0,00048	-0,00046	-0,00047	-0,00096	0,00084	0,00063	0,0015	0,0007	0,0009
q_k	47	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00017	-0,00070	0,00199	0,0018	0,0013	0,0000
q_k	48	-0,00096	-0,00097	-0,00099	-0,00181	0,00029	-0,00200	0,0011	0,0007	0,0010
q_k	49	-0,00472	-0,00472	-0,00474	-0,00538	-0,00464	-0,00613	0,0013	0,0019	0,0006
q_k	50	-0,00471	-0,00472	-0,00472	-0,00505	-0,00645	-0,00443	0,0017	0,0003	0,0017
q_k	51	-0,00050	-0,00048	-0,00048	0,00027	0,00111	-0,00076	0,0012	0,0004	0,0017
q_k	52	-0,00005	-0,00004	-0,00003	-0,00088	-0,00168	0,00168	0,0012	0,0004	0,0003
q_k	53	-0,00004	-0,00004	-0,00006	-0,00075	-0,00091	0,00040	0,0013	0,0011	0,0015
q_k	54	-0,00033	-0,00033	-0,00031	0,00132	0,00133	-0,00131	0,0003	0,0003	0,0010
q_k	55	-0,00027	-0,00030	-0,00029	0,00131	-0,00138	0,00082	0,0004	0,0009	0,0009
q_k	56	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00109	0,00028	-0,00124	0,0009	0,0017	0,0008
q_k	57	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00001	-0,00037	0,00049	0,0020	0,0016	0,0015
q_k	58	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00048	0,00125	0,00151	0,0015	0,0007	0,0005
q_k	59	-0,00123	-0,00123	-0,00123	-0,00166	0,00031	-0,00121	0,0016	0,0005	0,0020
q_k	60	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00019	-0,00187	-0,00133	0,0018	0,0001	0,0007
q_k	61	-0,01528	-0,01526	-0,01527	-0,01458	-0,01516	-0,01365	0,0013	0,0019	0,0004
q_k	62	-0,00037	-0,00038	-0,00039	0,00050	-0,00210	-0,00078	0,0011	0,0003	0,0016
q_k	63	0,00000	0,00000	0,00000	0,00178	0,00014	-0,00083	0,0002	0,0019	0,0012
q_k	64	-0,00279	-0,00279	-0,00281	-0,00262	-0,00297	-0,00325	0,0018	0,0018	0,0016
q_k	65	-0,00071	-0,00071	-0,00072	-0,00048	-0,00084	-0,00222	0,0018	0,0019	0,0005
q_k	66	-0,00021	-0,00021	-0,00023	0,00117	-0,00111	-0,00007	0,0006	0,0011	0,0018
q_k	67	-0,00022	-0,00023	-0,00022	0,00167	0,00108	-0,00079	0,0001	0,0007	0,0014
q_k	68	-0,00033	-0,00035	-0,00034	0,00165	-0,00005	0,00002	0,0000	0,0017	0,0016
q_k	69	-0,00034	-0,00034	-0,00035	0,00013	0,00016	-0,00107	0,0015	0,0015	0,0013
v	1	1,00000	1,00000	1,00000	0,99421	1,02161	0,99755	0,0162	0,0004	0,0195
v	2	0,99997	0,99997	0,99997	0,99852	0,99435	1,00887	0,0206	0,0164	0,0131
v	3	0,99994	0,99994	0,99994	1,00768	1,01771	0,99431	0,0143	0,0042	0,0164
v	4	0,99984	0,99986	0,99985	1,01557	1,00376	1,00322	0,0063	0,0181	0,0186
v	5	0,99903	0,99904	0,99902	0,99562	1,01531	0,99666	0,0186	0,0057	0,0196
v	6	0,99011	0,99014	0,99007	0,97999	0,98653	0,98859	0,0119	0,0184	0,0205
v	7	0,98083	0,98087	0,98077	0,96860	0,98888	0,97083	0,0098	0,0140	0,0121
v	8	0,97861	0,97867	0,97857	0,99585	0,97790	0,96748	0,0048	0,0212	0,0109
v	9	0,97748	0,97753	0,97743	0,98009	0,99864	0,96993	0,0194	0,0009	0,0145
v	10	0,97249	0,97255	0,97240	0,96868	0,98611	0,99140	0,0182	0,0084	0,0030
v	11	0,97140	0,97145	0,97129	0,97579	0,97576	0,96796	0,0176	0,0177	0,0187
v	12	0,96824	0,96830	0,96810	0,98789	0,96029	0,94992	0,0024	0,0140	0,0038
v	13	0,96533	0,96540	0,96512	0,97140	0,97552	0,96034	0,0159	0,0119	0,0172
v	14	0,96244	0,96252	0,96218	0,97995	0,97399	0,94038	0,0045	0,0105	0,0002
v	15	0,95957	0,95967	0,95927	0,95400	0,96079	0,94958	0,0164	0,0209	0,0123
v	16	0,95904	0,95914	0,95873	0,94037	0,95385	0,97200	0,0033	0,0167	0,0087
v	17	0,95816	0,95826	0,95784	0,95666	0,97547	0,97256	0,0205	0,0048	0,0073
v	18	0,95815	0,95825	0,95783	0,97318	0,93884	0,96736	0,0070	0,0026	0,0125
v	19	0,95769	0,95779	0,95735	0,97547	0,97052	0,97414	0,0042	0,0093	0,0052
v	20	0,95739	0,95749	0,95705	0,97023	0,94473	0,94470	0,0092	0,0092	0,0096
v	21	0,95691	0,95701	0,95656	0,96076	0,97115	0,95628	0,0181	0,0079	0,0217
v	22	0,95690	0,95700	0,95656	0,97701	0,97505	0,93857	0,0019	0,0039	0,0040
v	23	0,95683	0,95693	0,95648	0,95404	0,96274	0,96560	0,0192	0,0162	0,0129
v	24	0,95667	0,95677	0,95632	0,96133	0,97026	0,94471	0,0173	0,0085	0,0104
v	25	0,95650	0,95660	0,95616	0,95303	0,97576	0,96250	0,0185	0,0028	0,0157
v	26	0,95643	0,95653	0,95609	0,93551	0,93649	0,95252	0,0011	0,0020	0,0184
v	27	0,95641	0,95651	0,95607	0,94566	0,95161	0,96205	0,0112	0,0171	0,0160

v	28	0,99993	0,99994	0,99993	0,99134	1,01455	0,98448	0,0134	0,0074	0,0066
v	29	0,99986	0,99987	0,99985	1,01089	1,01175	1,02165	0,0110	0,0101	0,0002
v	30	0,99973	0,99975	0,99973	1,02150	0,98460	0,98088	0,0002	0,0068	0,0031
v	31	0,99971	0,99973	0,99971	1,00078	0,98510	1,00180	0,0209	0,0074	0,0199
v	32	0,99960	0,99963	0,99960	0,99021	1,01087	0,98516	0,0126	0,0108	0,0076
v	33	0,99935	0,99939	0,99934	0,99660	0,98771	1,00167	0,0192	0,0103	0,0197
v	34	0,99900	0,99908	0,99900	1,01534	0,97896	1,00296	0,0057	0,0019	0,0180
v	35	0,99892	0,99903	0,99893	0,97729	1,00750	1,00610	0,0004	0,0135	0,0148
v	36	0,99992	0,99993	0,99992	1,01429	0,98882	0,98945	0,0076	0,0109	0,0115
v	37	0,99975	0,99976	0,99975	0,98988	1,02021	1,01960	0,0121	0,0015	0,0022
v	38	0,99958	0,99960	0,99960	1,00262	0,99127	1,00274	0,0190	0,0137	0,0189
v	39	0,99953	0,99955	0,99955	0,98967	1,00326	1,00837	0,0121	0,0183	0,0132
v	40	0,99953	0,99955	0,99955	1,01579	1,01935	1,01065	0,0057	0,0022	0,0109
v	41	0,99880	0,99886	0,99885	0,97978	0,99057	1,01619	0,0030	0,0137	0,0047
v	42	0,99849	0,99857	0,99856	1,00506	0,99497	1,01190	0,0154	0,0184	0,0087
v	43	0,99845	0,99853	0,99852	0,98474	0,97776	0,98375	0,0083	0,0012	0,0072
v	44	0,99845	0,99852	0,99851	1,01113	1,00371	0,98138	0,0093	0,0168	0,0049
v	45	0,99835	0,99843	0,99841	0,97952	0,99859	0,97778	0,0032	0,0218	0,0014
v	46	0,99835	0,99843	0,99841	0,98335	0,99270	0,99338	0,0070	0,0163	0,0170
v	47	0,99979	0,99981	0,99980	0,98824	1,01191	0,99370	0,0105	0,0099	0,0159
v	48	0,99854	0,99856	0,99855	1,01259	1,00674	0,99032	0,0080	0,0138	0,0138
v	49	0,99470	0,99472	0,99470	1,01000	1,01403	1,00394	0,0067	0,0027	0,0128
v	50	0,99416	0,99418	0,99416	1,00738	0,97935	0,98827	0,0088	0,0072	0,0161
v	51	0,97858	0,97863	0,97853	0,98268	0,99955	0,96114	0,0179	0,0011	0,0046
v	52	0,97857	0,97862	0,97853	0,96780	0,96492	0,99967	0,0112	0,0083	0,0009
v	53	0,97470	0,97475	0,97465	0,96243	0,97241	0,96991	0,0097	0,0197	0,0173
v	54	0,97147	0,97151	0,97140	0,98188	0,98862	0,95932	0,0116	0,0049	0,0099
v	55	0,96700	0,96705	0,96693	0,96423	0,97364	0,97344	0,0192	0,0154	0,0155
v	56	0,96264	0,96268	0,96255	0,95475	0,95982	0,97869	0,0141	0,0191	0,0059
v	57	0,94019	0,94026	0,94007	0,94284	0,92515	0,95044	0,0194	0,0069	0,0116
v	58	0,92915	0,92922	0,92900	0,93549	0,92923	0,93018	0,0157	0,0220	0,0208
v	59	0,92487	0,92495	0,92472	0,91977	0,93126	0,91450	0,0169	0,0157	0,0118
v	60	0,91985	0,91994	0,91969	0,92831	0,91158	0,91745	0,0135	0,0136	0,0198
v	61	0,91247	0,91256	0,91229	0,89383	0,89989	0,91062	0,0034	0,0093	0,0203
v	62	0,91218	0,91227	0,91200	0,90926	0,89075	0,89790	0,0191	0,0005	0,0079
v	63	0,91179	0,91189	0,91161	0,92324	0,90351	0,92391	0,0105	0,0136	0,0097
v	64	0,90990	0,91000	0,90970	0,92230	0,90255	0,92650	0,0096	0,0146	0,0052
v	65	0,90934	0,90944	0,90912	0,91246	0,92419	0,90670	0,0189	0,0072	0,0196
v	66	0,97134	0,97140	0,97123	0,97950	0,96264	0,96935	0,0138	0,0132	0,0201
v	67	0,97134	0,97140	0,97123	0,96091	0,99222	0,98923	0,0116	0,0012	0,0040
v	68	0,96792	0,96797	0,96776	0,97950	0,94922	0,97902	0,0104	0,0032	0,0107
v	69	0,96792	0,96797	0,96776	0,97359	0,97890	0,96958	0,0163	0,0111	0,0202

(1) Se este valor for positivo, significa que o erro é um ruído normal. Caso de negativo indica erro grosseiro ou erro extremo

Fonte: o autor (2017).